

DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE COBERTURA DE PARQUEAMENTO COM APROVEITAMENTO SOLAR

CÁTIA SOFIA ALVES CORREIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Professora Doutora Elsa de Sá Caetano

Mestre Pedro Gil Marques de Queirós Ferreira

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, Luís e Aldina, e irmão, Bruno

Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe por provar o contrário

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho, nomeadamente:

- à minha orientadora, Professora Elsa Caetano, pelo seu incentivo, paciência e constante disponibilidade;
- ao meu co-orientador, Eng.º Pedro Ferreira, pelo seu empenho, atenção e motivação demonstradas;
- ao Mestre Rui Faria, engenheiro da empresa Martifer, pelo apoio prestado;
- a todos os intervenientes que contribuíram para a correta redação do documento presente;
- aos meus pais e ao meu irmão por todo o apoio durante esta longa e difícil jornada de vida académica e, acima de tudo, pelo seu amor e dedicação durante toda a minha vida;
- a todos os meus amigos, pela compreensão, amizade e ajuda que prestaram;
- à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela oportunidade de integração desta vida académica.

RESUMO

Com a preocupação crescente em criar uma sociedade sustentável, ou seja, uma sociedade que satisfaça as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, tornou-se necessário criar alternativas às energias fósseis, que acarretam problemas económicos e ambientais.

A solução a este problema passa pela utilização de fontes de energia inesgotáveis que, derivam do meio ambiente e são conhecidas como “energias renováveis”. Portugal, devido à sua localização geográfica, é um dos países com grande potencial de aproveitamento destas energias alternativas.

A energia solar é uma das fontes alternativas mais atraentes para o futuro pois, além das suas características não poluentes, a quantidade de energia disponível para conversão é equivalente a várias vezes o atual consumo energético mundial. A tecnologia fotovoltaica permite converter diretamente a energia solar em energia elétrica. Uma das possíveis aplicações dos sistemas fotovoltaicos consiste na sua integração em coberturas de parques de estacionamento, as quais proporcionam uma área ampla e livre para o aproveitamento da energia proveniente do Sol.

Atualmente, existem várias soluções de sistemas estruturais rígidos com aproveitamento de energia solar. Neste trabalho será dado ênfase à solução SmartPark, da empresa Martifer, constituída por uma estrutura de suporte em perfis de aço enformados a frio, e uma cobertura formada por painéis fotovoltaicos rígidos de tecnologia monocristalina de silício. Ao longo do trabalho são abordados os conceitos fundamentais da análise e dimensionamento de estruturas com perfis de aço enformados a frio e os fenómenos de encurvadura associados a estes. Será apresentada uma comparação entre o EC3-Parte-1-3, dedicado à análise de perfis de aço enformados a frio, e o Método da Resistência Direta (MRD), um procedimento alternativo de análise em que se baseia o código americano.

Como alternativa ao sistema estrutural anterior, pretende-se criar uma estrutura em membrana tensa que suporte um sistema fotovoltaico em filme fino flexível. A estrutura de suporte será constituída por perfis tubulares ocos, de aço laminado a quente, e a cobertura será formada por uma membrana tensa que, sustenta os painéis de filme fino flexível de silício amorfo. Serão especificados os requisitos quanto aos painéis a aplicar e os desafios ainda presentes na sua junção com a membrana.

Serão abordados aspetos gerais das estruturas de membranas relativamente aos materiais, ligações e respetiva influência na forma e comportamento das estruturas. De seguida, referem-se bases de dimensionamento, critérios de segurança e ações de projeto, bem como os métodos de análise numérica, mais frequentes, quer na determinação da forma, quer na análise estática e dinâmica.

Por último, será apresentada uma avaliação económica das soluções estudadas. Como critérios de comparação, foram utilizados os custos associados a cada solução, bem como, a energia que se estima produzir com a aplicação dos diferentes sistemas fotovoltaicos.

PALAVRAS-CHAVE: Parque de estacionamento; perfis de aço enformados a frio; estruturas em membrana tensa; sistemas fotovoltaicos; filme fino flexível.

ABSTRACT

The increasing concern in reaching a sustainable society, capable of satisfying the corresponding needs without compromising future generations, has led to the need to re-evaluate the usage of fossil fuels due to economical and environmental impacts.

As part of this process, the use of renewable sources of energy has been increasingly considered. Due to the geographic location, Portugal presents an enormous potential in the use of renewable energy.

The solar energy is one of the most attractive energies for the future because of its non pollutant characteristics and infinite availability. It could also be efficient in satisfying several times the consumption of all humanity. Photovoltaic systems converts solar energy to electric energy directly and can be used in parking stations, providing a wide and free area to use this kind of energy source with no restrictions.

Nowadays, there are many solutions for structural rigid systems with solar energy use. In the present study, the main focus will be on SmartPark by Martifer enterprise, formed by cold formed steel profiles, with a monocrystalline coverage in silicon. Throughout the present study the fundamental analysis and design concepts of cold formed steel structures and the associated buckling phenomena will be addressed. It will be presented a comparison between the methodology proposed in EC3-Part-1-3, and Direct Strength Method, both responsible for the analysis of steel cold formed structures.

As an alternative to the structural rigid system, it is intended to create a tensile membrane supporting photovoltaic systems made of a flexible thin-film. The support structure will be composed by hollow tubular profiles, of hot-rolled steel and the coverage will be formed by a tensile membrane which sustains the thin flexible panels of massive silicon. The conditions to apply to such panels will be specified and a discussion will be presented centred on the union between this component and the membrane.

Furthermore, the main structural characteristics of the membranes will be presented namely regard up the material, connections and correspondent influence in the structures' behaviour. Subsequently, the fundamental design bases, safety criteria and design loads, as well as numerical analysis methods mostly employed will be referred, in order to define the shape of the structure and determine the corresponding static and dynamic behaviour.

Finally, an economic evaluation for the several solutions studied will be presented. The choice for the best solution will be the result of the comparison between the costs of the structural solutions added of the energy consumption as well as the ones associated with the different photovoltaic systems.

KEYWORDS: Parking Station, Cold Formed Steel Profiles, Tensile Membrane Structure, Photovoltaic System, Flexible Thin-Film.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1. SISTEMA ESTRUTURAL PARA PARQUES DE ESTACIONAMENTO	5
2.1.1. SISTEMA DE COBERTURA RÍGIDA	5
2.1.1.1. Solução <i>VELA (CITYSÍ)</i>	7
2.1.1.2. Solução <i>Home Parking (Giulio Barbieri)</i>	8
2.1.2. SISTEMA DE COBERTURA FLEXÍVEL	9
2.1.2.1. Solução <i>Architectural Car Parks (MakMax)</i>	9
2.2. TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA	12
2.2.1. MATERIAIS CRISTALINOS	14
2.2.2. CÉLULA DE FILME FINO	15
2.2.3. CÉLULAS E POLÍMEROS ORGÂNICOS	16
2.2.4. CÉLULA SOLAR HÍBRIDA	17
2.2.5. CÉLULAS SENSIBILIZADAS COM CORANTE	17
2.3. APLICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM PARQUES DE ESTACIONAMENTO	18
2.3.1. SISTEMAS RÍGIDOS	18
2.3.1.1. SOLUÇÃO <i>SMARTPARK</i>	20
2.3.2. SISTEMAS FLEXÍVEIS	21
2.3.2.1. Solução <i>Skyshades</i>	22
2.3.2.2. Solução <i>Hightex</i>	24
2.3.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E CAPACIDADE DE PRODUÇÃO	26
3. ESTRUTURAS EM MEMBRANA TENSA	29
3.1. SISTEMA ESTRUTURAL	32
3.1.1. ELEMENTOS RESISTENTES LINEARES	33
3.1.2. ELEMENTOS RESISTENTES DE SUPERFÍCIE	35

3.2. DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES DE CORTE	38
3.3. FORMA.....	39
3.3.1. FORMA ANTICLÁSTICA	39
3.3.2. FORMA SINCLÁSTICA	41
3.4. REGRAS DE DIMENSIONAMENTO	42
3.4.1. COEFICIENTES DE SEGURANÇA PARA MEMBRANAS.....	43
3.4.2. COEFICIENTES DE SEGURANÇA PARA CABOS	44
3.5. AÇÕES EM ESTRUTURAS DE MEMBRANA	46
3.5.1. PRÉ-ESFORÇO.....	47
3.5.2. PESO PRÓPRIO	47
3.5.3. AÇÃO DO VENTO	47
3.5.4. AÇÃO DA NEVE.....	48
3.5.5. AÇÃO DA TEMPERATURA.....	48
3.5.6. AÇÃO SÍSMICA	49
3.6. PROGRAMAS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO DE APOIO AO DIMENSIONAMENTO.....	49
4. SISTEMA RÍGIDO - SMARTPARK	51
4.1. SISTEMA ESTRUTURAL	51
4.2. AÇÕES DE CÁLCULO	54
4.2.1. AÇÃO DO VENTO	55
4.2.2. AÇÃO DA NEVE.....	59
4.2.3. AÇÃO DO SISMO	60
4.3. COMBINAÇÃO DE AÇÕES	63
4.4. ANÁLISE ESTRUTURAL	64
4.4.1. ANÁLISE ESTRUTURAL PELO EC3.....	65
4.4.2. ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA (MRD)	76
4.4.2.1. Cálculo da resistência de colunas.....	77
4.4.2.2. Cálculo da resistência de vigas.....	80
4.4.2.3. Cálculo da resistência viga-coluna.....	82
5. SISTEMA FLEXÍVEL	83
5.1. SISTEMA ESTRUTURAL	83
5.1.1. DETERMINAÇÃO DA FORMA	85
5.2. AÇÕES DE CÁLCULO	91
5.2.1. PESO PRÓPRIO DA ESTRUTURA E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	91

5.2.2. PRÉ-ESFORÇO	92
5.2.3. VENTO	92
5.2.4. NEVE	92
5.3. COMBINAÇÃO DE AÇÕES	93
5.4. ANÁLISE ESTRUTURAL	93
5.5. PADRÕES DE CORTE	100
6. ESTUDO ECONÓMICO DE UM SISTEMA DE APROVEITAMENTO FOTOVOLTAICO	103
6.1. SISTEMA DE APROVEITAMENTO FOTOVOLTAICO	103
6.1.1. SISTEMA FOTOVOLTAICO RÍGIDO	108
6.2. BALANÇO ECONÓMICO	111
6.3. COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES	113
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
BIBLIOGRAFIA	117
Anexos	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.1 – Solar Canopy, Chicago	2
Fig.1.2 – Estrutura pneumática com aproveitamento fotovoltaico	3
Fig.1.3 – Estrutura de membrana tencionada por cabos com aproveitamento fotovoltaico	3
Fig.2.1 – Estrutura rígida tradicional: a) Parque Intermaché Bragança; b) Parque, USA	6
Fig.2.2 – Estrutura de suporte: a) aço galvanizado; b) alumínio	6
Fig.2.3 – Junção de módulos	7
Fig.2.4 – VELA, 2 módulos conjuntos	7
Fig.2.5 – Solução VELA: a) Dimensões do módulo; b) Junção de dois módulos	8
Fig.2.6 – Solução Home Parking: a) Junção de módulos; b) Módulo com 2 lugares de estacionamento	8
Fig.2.7 – Estrutura em membrana tensa de alta densidade	9
Fig.2.8 – Solução Architectural Car Parks: a) Single Bay; b) Double Bay; c) Hypar; d) Mass Coverage	10
Fig.2.9 – Dimensões da solução Single Bay (adaptado)	11
Fig.2.10 – Solução Double Bay, adaptado: a) Central Column; b) Walkway; c) Perimeter Columns ...	12
Fig.2.11 – Material PV, adaptado	13
Fig.2.12 – Módulo Fotovoltaico	14
Fig.2.13 – Células PV em polímeros	16
Fig.2.14 – Car Schell Energy, GREENPARK	18
Fig.2.15 – Solução SmartPark	20
Fig.2.16 – Tipologias da solução SmartPark	20
Fig.2.17 – Estruturas de estacionamento baseadas na utilização de membranas tensas - Soluções SkyShades	23
Fig.2.18 – “Bolsos” soldados para inserção de filme fino	23
Fig.2.19 – Eficiência de OPV	24
Fig.2.20 – Estrutura em membrana pneumática	25
Fig.2.21 – PV flexíveis em membranas ETFE	25
Fig.2.22 – PV flexíveis em membranas em PTFE	26
Fig.2.23 – Sistemas fotovoltaicos: a) ligado à rede; b) autónomo	26
Fig.3.1 – Parque Mercedes Benz, Alemanha	29
Fig.3.2 – Estudo de área mínima com película de sabão	30
Fig.3.3 – Fases de projeto de uma estrutura em membrana tensa	31

Fig.3.4 – Classificação das estruturas em membrana tensa	32
Fig.3.5 – Junção de elementos lineares	33
Fig.3.6 – Fixação de fitas de bordo a elemento construtivo	34
Fig.3.7 – Pormenor de elemento keder na membrana	34
Fig.3.8 – Tipos de bordos flexíveis (a, b, c e d) e bordos rígidos (e, f, g e h): a) com fita; b) com cordão; c) com cordão e fita; d) com placa metálica suspenso por cordão; e) com tubo; f) com placa metálica; g) com placa metálica com suporte; h) tubular com entrelaçamento	35
Fig.3.9 – Pormenor esquina: a) com cordões; b) com cordões e reforço com fitas; c) com cordões e fitas	35
Fig.3.10 – Tipos de membranas.....	35
Fig.3.11 – Cortes representando amplitudes de deslocamentos da teia e da trama, depois da fiação	36
Fig.3.12 – Tipos de ligações de superfície: a) junta soldada; b) junta costurada; c) junta costurada com aba; d) ligação em chapa metálica; e) ligação cordoada; f) ligação entrelaçada	37
Fig.3.13 – Exemplo de arranjos possíveis dos painéis de membrana: a) radial; b) paralelo	38
Fig.3.14 – Modelos anticlásticos: a) Parabolóide hiperbólico; b) Conjunto de módulos	40
Fig.3.15 – Estruturas anticlásticas: a) Cone; b) Sela; c) Parabolóide Hiperbólico; d) Cume e vale	41
Fig.3.16 – Projeto Éden – Reino Unido.....	41
Fig.3.17 – Estruturas Pneumáticas: a) Insuflada; b) Aspirada; c) Infladas	42
Fig.4.1 – SmartPark: a) Representação esquemática; b) Modelo de cálculo ROBOT	51
Fig.4.2 – Estrutura principal: a) Dimensões; b) Modelo de cálculo ROBOT	52
Fig.4.3 – Estrutura secundária: a) Dimensões; b) Modelo de cálculo ROBOT	52
Fig.4.4 – Zonas de diferente pressão da ação do vento.....	57
Fig.4.5 – Casos de carga (c_r) e respetiva localização de centro de pressão.....	58
Fig.4.6 – Coeficiente de forma para a carga da neve (disposição de carga EC1)	60
Fig.4.7 – Espetros de cálculo para solo do tipo B.....	62
Fig.4.8 – Fluxograma de verificação da segurança ao ELU de estabilidade.....	67
Fig.4.9 – Diagrama 1 - Verificação da segurança de colunas: encurvadura por flexão e encurvadura por flexão/torção.....	68
Fig.4.10 – Diagrama 2 - Verificação da segurança de vigas: encurvadura lateral	69
Fig.4.11 – Diagrama 3 - Verificação da segurança de viga-coluna: Encurvadura lateral, flexão, flexão/torção	69
Fig.4.12 – Diagrama de esforço axial para a envolvente das combinações em ELU (kN) – Pórtico Extremidade	71
Fig.4.13 – Diagrama de momentos fletores para a envolvente das combinações em ELU (kN.m) – Pórtico Extremidade	72

Fig.4.14 – Diagrama de esforço axial para a envolvente das combinações em ELU (kN) – Pórtico Intermédio.....	72
Fig.4.15 – Diagrama de momentos fletores para a envolvente das combinações em ELU (kN.m) – Pórtico Intermédio	73
Fig.4.16 – Diagrama de deformações para a combinação mais desfavorável (cm).....	74
Fig.4.17 – Diagrama de momentos fletores para a envolvente das combinações em ELU (kN.m)	75
Fig.4.18 – Diagrama de deformações para a combinação mais desfavorável (cm).....	75
Fig.4.19 – Exemplo de aplicação do CUFSM	76
Fig.4.20 – Curvas de resistência local e distorcional para uma coluna impedida de encurvar	77
Fig.4.21 – Resultados CUFSM: Compressão	79
Fig.4.22 – Curvas de resistência local e distorcional para uma viga impedida de encurvar lateralmente.....	80
Fig.4.23 – Resultados CUFSM: Flexão sobre o eixo de maior inércia	82
Fig.5.1 – Sistema Flexível	84
Fig.5.2 – Isolinhas após a determinação da forma	84
Fig.5.3 – Definição da fronteira da membrana.....	86
Fig.5.4 – Definição da malha quadrada	87
Fig.5.5 – Determinação da forma.....	88
Fig.5.6 – Tensões na direção principal da membrana	88
Fig.5.7 – Tensões na direção secundária da membrana.....	89
Fig.5.8 – Direção e intensidade das tensões principais.....	89
Fig.5.9 – Forças de reação (kN).....	90
Fig.5.10 – Tensão nos elementos lineares de membrana e cabo	92
Fig.5.11 – Forças nos elementos de cabo	91
Fig.5.12 – Esquema de cálculo da largura dos elementos de membrana.....	94
Fig.5.13 – Modelo de cálculo da estrutura flexível, SAP2000	94
Fig.5.14 – Estrutura metálica de suporte	95
Fig.5.15 – Forças na membrana – Pré-esforço e peso próprio (kN)	95
Fig.5.16 – Forças na membrana – Vento ascendente (kN)	96
Fig.5.17 – Deformação – Vento ascendente.....	96
Fig.5.18 – Forças na membrana – Neve e vento descendente (kN)	97
Fig.5.19 – Deformação – Neve e vento descendente.....	97
Fig.5.20 – Esforço axial – Vento ascendente.....	98
Fig.5.21 – Deformada estrutura sem contraventamento (escala 1:1).....	99

Fig.5.22 – Estrutura com reforço de contraventamento.....	99
Fig.5.23 – Realização dos padrões de corte.....	100
Fig.5.24 – Padrões de corte	101
Fig.5.25 – Padrões de corte – Estrutura	101
Fig.6.1 – Índice kWh/Wp em sistemas fotovoltaicos ligados à rede	106
Fig.6.2 – Esquema de um gerador fotovoltaico ligado à rede	107
Fig.6.3 – Membrana fotovoltaica Texysolar	108
Fig.6.4 – Costura do filme fino à base de silicone	109
Fig.6.5 – Película aderente da solução Texysolar	109
Fig.6.6 – Disposição dos painéis fotovoltaicos na cobertura de membrana.....	110
Fig.6.7 – Solução Texysolar 25Wp – Twin.....	113

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Materiais usados no Architectural Car Parks (tabela adaptada)	10
Tabela 2.2 – Eficiência de células solares e módulos, adaptado de [14]	17
Tabela 2.3 – Fornecedores de sistemas rígidos com sistema fotovoltaico	19
Tabela 2.4 – Sistemas flexíveis com sistema fotovoltaico	21
Tabela 2.5 – Produtores de filme fino flexível	22
Tabela 2.6 – Tempo de carga de um aparelho em função da tecnologia fotovoltaica OPV, adaptado de [11].....	27
Tabela 3.1 – Coeficientes globais de segurança	43
Tabela 3.2 – Limite de tensões na fase de construção	45
Tabela 3.3 – Limite de tensões para condições de serviço	46
Tabela 4.1 – Propriedades do aço estrutural	53
Tabela 4.2 – Propriedades das secções	53
Tabela 4.3 – Parâmetros da ação do vento	57
Tabela 4.4 – Força e pressão da ação do vento.....	58
Tabela 4.5 – Definição da ação sísmica	60
Tabela 4.6 – Coeficientes ψ	63
Tabela 4.7 – Verificação ao esforço transversal da seção $\Omega 150 \times 1.5$	70
Tabela 5.1 – Características da membrana.....	85
Tabela 5.2 – Características do Cabo SS16.....	85
Tabela 5.3 – Características do aço estrutural	85
Tabela 6.1 – Radiação média mensal (kWh/m^2).....	106
Tabela 6.2 – Resultados do estudo fotovoltaico – sistema rígido do SmartPark Dual	108
Tabela 6.3 – Resultados do estudo fotovoltaico – sistema flexível	110
Tabela 6.4 – Resultados do estudo económico	112

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

T	– esforço de tração na membrana anticlástica [kN/m]
p	– pressão aplicada normal à superfície da membrana anticlástica [kN/m ²]
M	– esforço de tração na membrana sinclástica [kN/m]
r	– raio da superfície sinclástica [m]
F_{Ed}	– valor do esforço axial de cálculo
F_{Rd}	– valor do esforço da tensão resistente
C_p	– coeficiente de pressão (ação do vento)
E	– Módulo de elasticidade
ν	– coeficiente de poisson
G	– Módulo de distorção
c_{dir}	– coeficiente de direção
c_{season}	– coeficiente de sazão
$c_r(z)$	– coeficiente de rugosidade
$c_o(z)$	– coeficiente de orografia
z_0	– comprimento de rugosidade
k_r	– coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade
σ_v	– desvio padrão da turbulência
k_l	– coeficiente de turbulência
$c_{p,net}$	– coeficiente de pressão resultante
$q_p(z)$	– pressão dinâmica de pico
s_k	– valor característico da carga da neve ao nível do solo
T_r	– Resistência característica à tração do material da membrana
T_e	– Tensão admissível
T_p	– Valor médio do pré-esforço a instalar na membrana
S	– Coeficiente de Segurança (estruturas de membrana)
ε	– Extensão característica de rotura do material
G_{med}	– radiação incidente média anual
G_r	– radiação incidente, condições de referência STC
P_{max}^r	– potência máxima, condições de referência STC
η_{inv}	– rendimento do inversor

PVC – policloreto de vinilo

ETFE – etileno tetrafluoretileno

PTFE – politetrafluoretileno

PV – fotovoltaico

OPV – orgânico fotovoltaico

EVA – encapsulamento em acetato vinil etileno

EC – Eurocódigo

IASS – The International Association for Shell and Spatial Structures

MRD – método da resistência direta

MPL – Modo local de placa

MD – Modo distorcional

MG – Modo global

STC – Standard Test Conditions

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O atual paradigma energético assenta numa grande dependência dos combustíveis fósseis como fonte primária de energia, o que acarreta graves consequências para a atual e futura qualidade de vida da humanidade. Com o número de consumidores a aumentar e metas ambientais a cumprir, torna-se necessária uma alternativa para produzir energia de uma forma limpa e sustentável.

Portugal é um país com escassos recursos energéticos próprios, nomeadamente no que respeita às fontes de energia mais vulgares, as chamadas fontes não-renováveis. Tal situação de escassez conduz a uma elevada dependência energética do exterior, nomeadamente das importações de fontes primárias de origem fóssil, tornando-se deste modo necessário aumentar a contribuição das energias renováveis.

No entanto, e no que respeita às fontes de energia renováveis, o país tem um grande potencial que pode e deve ser explorado, não só numa ótica de reduzir a dependência energética externa, mas também do ponto de vista ambiental, no sentido de reduzir o consumo de energias que acarretam emissões de gases poluentes. O território português apresenta uma rede hidrográfica relativamente densa, uma elevada exposição solar, e dispõe de uma vasta frente marítima, o que lhe confere a possibilidade de aproveitar o potencial energético das fontes de energia renováveis [1].

As instalações solares fotovoltaicas apresentam variadas vantagens, das quais se destacam a excelente fiabilidade do sistema, a facilidade de manutenção, a possibilidade de armazenamento da eletricidade gerada em baterias e a inexistência de fontes de poluição.

Na União Europeia, Portugal é, depois da Grécia e da Espanha, o país com maior potencial de aproveitamento de energia solar. Com mais de 2300 horas/ano de insolação na Região Norte, e 3000 horas/ano no Algarve, o nosso país dispõe de uma situação privilegiada para o desenvolvimento deste tipo de energia. Contudo, além do elevado investimento inicial, a insuficiência e falta de adequabilidade dos incentivos atribuídos, a carência de regulamentos específicos e de normas de qualidade, têm dificultado o desenvolvimento das aplicações fotovoltaicas no nosso país [2].

Uma das possíveis aplicações desta tecnologia consiste na integração de painéis fotovoltaicos nas coberturas dos parques de estacionamento automóvel. Além da otimização do espaço ocupado, é criada uma solução rentável de produção de eletricidade.

Os sistemas fotovoltaicos podem fornecer energia elétrica para diversos fins, podendo fornecer exclusivamente energia elétrica à rede, ou para consumo próprio do investidor. No caso das soluções para parques de estacionamento, dependendo da dimensão do parque projetado, é comum a existência das duas soluções.

Com o desenvolvimento dos carros elétricos, tornou-se aliciante a reposição da energia das baterias com recurso a fontes de energia renováveis. Assim sendo, utilizando sistemas fotovoltaicos nas coberturas dos parques de estacionamento, seria possível recarregar as baterias dos carros elétricos enquanto estes estão estacionados.

Um exemplo destas estruturas corresponde ao *Solar Canopy* (Fig.1.1), projetado para coletar a energia solar para posterior uso na alimentação de veículos elétricos/híbridos. A sua conceção, pela *Carbon Day Automotive*, teve como objetivo promover iniciativas de sustentabilidade em Chicago.

A estrutura foi concebida de forma a adaptar e integrar um conjunto de tecnologias fotovoltaicas em diferentes orientações, oferecendo soluções sustentáveis para qualquer parte do mundo. Em aplicações de larga escala são criados parques de estacionamento, convertidos em estações de produção de energia para carregamento das baterias dos carros elétricos, com a possibilidade de a energia excedente ser doada à rede elétrica.



Fig.1.1 – *Solar Canopy*, Chicago¹

A estrutura de suporte foi projetada como uma árvore que apoia a cobertura plana. O material usado para a estrutura foi o aço, enquanto os painéis fotovoltaicos são adaptáveis a qualquer tecnologia.

Em alternativa ao sistema estrutural rígido, são utilizadas membranas tensas como cobertura do parque de estacionamento. Esta solução permite vencer vãos maiores, devido ao seu reduzido peso, e obter estruturas mais esbeltas e arquitetonicamente mais apelativas.

A origem das estruturas de membrana tensa remonta a dois mil anos atrás, na construção de tendas e toldos tradicionais. Muitos desenvolvimentos foram concebidos nos últimos anos de forma a aperfeiçoar as técnicas e materiais utilizados, para alcançar grandes vãos.

A membrana estrutural é o principal elemento que distingue as estruturas de membrana tensa. Para um desempenho satisfatório estas estruturas precisam de ser projetadas de maneira a que qualquer carregamento atuante faça com que toda a membrana esteja submetida a um estado de tensão de tração. Este estado de tensão, chamado de pré-esforço, é um dos pontos fundamentais no projeto destas estruturas [3].

¹ Fonte: http://www.bdcnetwork.com/13-structural-steel-buildings-dazzle?utm_campaign=BD%2BC%20eAlert%20-%204%2F30%2F13&utm_medium=newsletter&utm_source=BDC%20eAlert&utm_content=2928726

Os principais elementos de aplicação de pré-esforço são os cabos de tensão e, no caso das estruturas pneumáticas a pressão de ar. Quando o principal elemento de tensionamento da membrana são os cabos, a estrutura é apelidada de estrutura de membrana tensionada por cabos. Da mesma forma, quando o tensionamento da membrana se dá por pressão de ar, a estrutura é classificada como estrutura pneumática.

Para conjugar estas estruturas com o aproveitamento da energia solar é necessária a aplicação da tecnologia em filme fino fotovoltaico flexível. De outra forma, não seria viável o projeto de uma estrutura em membrana tensa com sistemas fotovoltaicos, uma vez que os painéis rígidos são aproximadamente 10 vezes mais pesados que os flexíveis e seria necessária a perfuração da membrana para a sua fixação [4].

Um exemplo de uma estrutura pneumática com aplicação de filme fino fotovoltaico é apresentado na Fig.1.2. Esta estrutura, da autoria da empresa BAT, emprega uma membrana de ETFE (etileno tetrafluoretileno) tensionada por pressão de ar. O sistema fotovoltaico é envolvido pela membrana, ficando protegido das ações exteriores.



Fig.1.2 – Estrutura pneumática com aproveitamento fotovoltaico²

A incorporação de sistemas fotovoltaicos em estruturas de membrana tensionada por cabos só muito recentemente mereceu atenção e constitui um desafio. O modo de fixação dos painéis e a escolha da tecnologia fotovoltaica a aplicar ainda requer investigação e algum cuidado por parte dos projetistas. Na Fig.1.3 é apresentado um protótipo em membrana de PVC, da empresa Sioen.



Fig.1.3 – Estrutura de membrana tensionada por cabos com aproveitamento fotovoltaico³

² Fonte: <http://www.batspain.com/etfe.html>

³ Fonte: <http://www.solvinaward.com/project/953/pvc-based-photovoltaic-pv-laminates>

1.2. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O objetivo primordial desta dissertação consiste no projeto de uma estrutura em membrana tensa com aplicação de um sistema fotovoltaico em filme fino flexível. A estrutura deve responder aos requisitos de um parque de estacionamento e, se possível, ser competitiva com as soluções rígidas já implementadas.

A presente dissertação está dividida em sete capítulos que, antes de se referirem às questões formais de análise e dimensionamento, dão uma perspetiva geral das soluções existentes para parques de estacionamento, e as possibilidades de implementação de sistemas fotovoltaicos. O primeiro capítulo, constituído pela introdução, faz uma breve referência ao problema em causa e descreve a metodologia de trabalho utilizada.

No segundo capítulo são apresentadas as soluções tradicionais de parques de estacionamento, tanto em sistemas estruturais rígidos como em sistemas estruturais em membrana tensa. São também abordadas as diferentes tecnologias fotovoltaicas e características dos seus componentes principais.

O terceiro capítulo centra-se em aspetos relacionados com estruturas em membrana tensa. São exploradas as condições de dimensionamento propriamente ditas, desde regulamentos e normas utilizadas para o efeito, quer para estruturas de cabos, quer para estruturas de membranas. São identificadas as ações principais neste tipo de projetos e os pormenores técnicos específicos destas estruturas.

O quarto capítulo consiste na análise de um parque de estacionamento pré-existente, com sistema estrutural rígido e solução fotovoltaica rígida. A solução em estudo é da autoria da empresa Martifer e denomina-se por *SmartPark*. Neste capítulo será abordada a metodologia de dimensionamento de perfis enformados a frio, visto que, a estrutura de suporte é constituída por este tipo de perfis. Foram utilizadas duas metodologias para verificação da segurança dos perfis de aço enformados a frio, uma baseada no EC3 e outra baseada no método da resistência direta (MRD) utilizado pelo regulamento americano, sendo posteriormente comparadas. O modelo de cálculo para obtenção dos esforços da estrutura foi desenvolvido no programa ROBOT.

O quinto capítulo foca o desenvolvimento de uma estrutura em membrana tensa, com dimensões semelhantes ao sistema rígido anteriormente referido. São apresentadas considerações quanto à forma da estrutura de suporte, ao material utilizado e à metodologia de dimensionamento da estrutura. Foi utilizado o *software* ForTen2000 na determinação da forma e padrões de corte da membrana. Adicionalmente, foi utilizada uma análise estática não linear-geométrica com recurso ao *software* SAP2000.

O sexto capítulo consiste numa abordagem económica simplificada das duas soluções em causa, sistema rígido e flexível. Além da determinação da estimativa da energia produzida anualmente, tanto pelo sistema fotovoltaico rígido, como pelo sistema fotovoltaico flexível, é apresentado um orçamento para as duas soluções.

Por fim, no sétimo capítulo são feitas considerações finais, e retiradas conclusões do trabalho realizado.

2

ESTADO DE ARTE

2.1. SISTEMA ESTRUTURAL PARA PARQUES DE ESTACIONAMENTO

A sociedade encontra-se em constante evolução. Atualmente, as zonas urbanas abrangem uma área cada vez maior, oferecendo um elevado número de recursos e serviços, enquanto as zonas rurais possuem uma menor densidade populacional, conjugada com limitada oferta de recursos e serviços.

Como há uma grande procura, a possibilidade de encontrar um espaço de estacionamento livre nas zonas urbanas é diminuta. Torna-se portanto necessário criar recursos para estabilizar a procura de um local de estacionamento.

Um parque de estacionamento é uma área criada especificamente para o estacionamento automóvel, de forma a permitir uma maior segurança do veículo, assim como aumentar a comodidade do condutor. Quando cobertos, os parques de estacionamento protegem o veículo das condições meteorológicas adversas tais como o sol, a chuva, a neve, o granizo e o vento.

Atualmente, admite-se que a largura de um lugar de estacionamento está compreendida entre 2,3 e 2,5 metros, e a profundidade ronda os 5 metros. Existem desde parques de estacionamento privados, com apenas um lugar, a coletivos, com vários lugares de estacionamento. Estes últimos podem ser encontrados em áreas residenciais, comerciais ou de serviços.

2.1.1. SISTEMA DE COBERTURA RÍGIDA

Este tipo de sistema estrutural apresenta uma oferta variada, desde os materiais utilizados, à forma estrutural adotada.

A solução tradicional (Fig.2.1) é geralmente idealizada em aço, visto ser um material que acarreta algumas vantagens: aproveitamento máximo do espaço, economia e rapidez de execução, possibilitando ainda formas arquitetónicas atrativas. A estrutura de suporte é caracterizada por pilares encastrados na base e ligados no topo por vigas que apoiam a cobertura, formada por chapas perfiladas ou onduladas.

O aço é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, com percentagens deste último variáveis entre 0,008 e 2,11%. Para evitar problemas de corrosão, utiliza-se habitualmente aço galvanizado ou inoxidável.

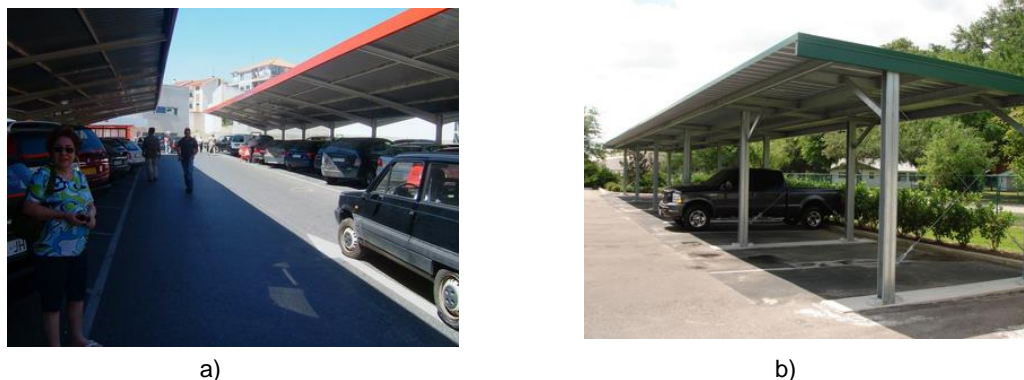


Fig.2.1 - Estrutura rígida tradicional: a) Parque Intermaché Bragança⁴; b) Parque, USA⁵

A galvanização é um dos processos mais eficazes e económicos para proteger o aço contra a corrosão. A produção de aço galvanizado consiste na submersão do aço em zinco fundido, provocando assim a reação entre as moléculas de ferro e zinco. O resultado é a criação de uma barreira protetora, bem como o acréscimo das propriedades resistentes à corrosão devido à ação conjunta dos materiais.

Por integrar cerca de 10% de cromo, o aço inoxidável concede à liga metálica proteção à corrosão. A vantagem principal deste aço é a resistência de toda a peça à corrosão e não apenas do revestimento. Contudo o aço inoxidável é consideravelmente mais caro e difícil de trabalhar, sendo apenas eleito em situações de cuidado extremo contra a corrosão[5].

Atualmente, o material utilizado não é obrigatoriamente o aço, podendo adotar-se o alumínio (Fig.2.2.b). Este também requer proteção contra a corrosão, sendo anodizado, ou seja mergulhado num banho ácido que permite a criação de uma camada porosa de óxido que estabiliza o processo de oxidação, impedindo a corrosão futura do alumínio.



Fig.2.2 - Estrutura de suporte: a) aço galvanizado [6]; b) alumínio [7]

Para a cobertura da estrutura de suporte também existem soluções alternativas tais como placas de vidro, painéis de polímeros ou coberturas em PVC. Neste trabalho será também explorada a possibilidade da cobertura ser efetuada por módulos fotovoltaicos.

⁴ Fonte: <http://santospassos.blogspot.pt/2007/09/o-que-que-bragana-tem.html>

⁵ Fonte: http://www.alibaba.com/showroom/car-parking-cover_5.html

Os vãos atingidos pela solução em alumínio alcançam aproximadamente 3, 5 ou 7 metros, dependendo da tipologia do parque pretendido. Habitualmente, o número máximo de estacionamentos paralelos por vão é de três, perfazendo assim um vão de aproximadamente 7 metros. Para construir parques completos, é necessária a junção de módulos paralelamente e transversalmente, tal como indicado na Fig.2.3.



Fig.2.3 - Junção de módulos [7]

Existem inúmeras empresas que providenciam soluções deste tipo com *designs* e materiais distintos, tanto na cobertura como na estrutura. De forma a evidenciar a oferta do mercado destas soluções, são expostos dois exemplos e o custo associado a cada um.

2.1.1.1. Solução VELA (CITYSÍ)

Da combinação entre a engenharia e o *design*, resultou esta solução de parque de estacionamento coberto, designado por VELA (Fig.2.4), fruto da empresa CITYSÍ.[6] A sua estética apelativa e elegante é conciliada com a eficiência estrutural procurada.



Fig.2.4 - VELA, 2 módulos conjuntos

A estrutura é composta pelos seguintes elementos:

- Duas colunas estruturais constituídas por duas chapas de aço cortadas a laser com 15 mm de espessura cada, acopladas por meio de placas de aço de 30 mm de espessura;
- O sistema de cobertura é realizado em vigas com perfis de aço de dimensão 120x60 mm, com espessura de 2 mm;

- Os pilares e as vigas são ancorados por meio de placas de aço com 6 mm de espessura;
- A cobertura é formada por chapas de aço enformadas a frio com espessura entre 10 a 15 mm;
- Tanto a estrutura como a cobertura estão disponíveis em aço galvanizado simples ou pintado;
- As dimensões de cada módulo são apresentadas na Fig.2.5 a): 4700 mm de profundidade, uma altura de 2740 mm e 5030 mm de distância entre pilares.

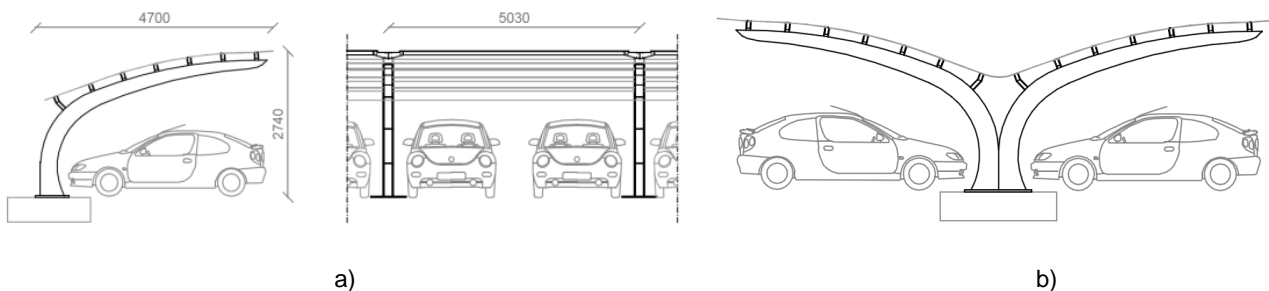


Fig.2.5 – Solução VELA: a) Dimensões do módulo; b) Junção de dois módulos

Na Fig.2.5.b é apresentada a junção transversal dos módulos. Com este processo, ocorre uma economia de material, reduzindo o custo dos módulos adjacentes.

2.1.1.2 Solução Home Parking (Giulio Barbieri)

Home Parking (Fig.2.6) é uma solução em perfis de alumínio anodizado proveniente de uma empresa italiana que adapta a estrutura às especificações do cliente [7]. As juntas de aço são tratadas com uma pintura de proteção e revestidas com pó de poliéster, evitando assim futuras intervenções de manutenção. Tem como vantagens o reduzido trabalho associado ao sistema de fundação (base de betão armado pregado ao solo) e a versatilidade do material de cobertura. Consiste numa solução modular com 1, 2 ou no máximo 3 estacionamentos paralelos. Permite soluções alternativas como estacionamento em ângulo e diferentes dimensões da solução padronizada.



Fig.2.6 – Solução Home Parking: a) Junção de módulos; b) Módulo com 2 lugares de estacionamento

Os sistemas de cobertura usuais são em PVC ou painéis de vidro. A cobertura em PVC está disponível numa ampla gama de tecidos e cores, enquanto as placas de vidro apenas variam na cor.

Este sistema tem a capacidade de resistir a uma velocidade média de 100 km/h e uma carga relativa à neve de 120 kg/ m². Ainda é caracterizado pela facilidade de construção e não requer mão-de-obra especializada.

2.1.2. SISTEMA DE COBERTURA FLEXÍVEL

Este tipo de solução consiste numa estrutura de suporte em elementos metálicos que dá apoio à cobertura em membrana tensa.

Ao adotar este tipo de solução, reduz-se o peso da cobertura, o número de pilares e o aço estrutural da base de suporte, alcançando-se assim longos vãos livres (Fig.2.7). Outro fator de impacto, é o aspeto arquitetónico associado às membranas, tornando a solução mais elegante e esteticamente apelativa.



Fig.2.7 - Estrutura em membrana tensa de alta tenacidade [8]

Nas membranas, os materiais preponderantes são o poliéster revestido a policloreto de vinilo (PVC) bem como as fibras de vidro revestidas a politetrafluoretileno (PTFE). No entanto, o revestimento com silicone é também utilizado. A escolha do material é baseada nas vantagens e desvantagens referentes às propriedades resistentes e mecânicas, entre outras.

2.1.2.1. Solução *Architectural Car Parks (MakMax)*

A corporativa *MakMax*, apresenta uma ampla gama de soluções intituladas por *Architectural Car Parks* [8], que vão desde estacionamentos privados até coberturas para grandes edifícios comerciais. Estas conduzem a uma proteção eficaz contra sol, chuva, neve, granizo e vento.

Esta solução serve vários modelos de parque de estacionamento com diferentes coberturas contra intempéries. Todos os tecidos e acabamentos de aço estão disponíveis em várias cores e acabamentos. Na tabela 2.1 estão descritos os materiais que são utilizados e alguns parâmetros característicos destes.

Tabela 2.1 - Materiais usados no *Architectural Car Parks* (tabela adaptada)

	Tipo de membrana e características			Acabamento de aço galvanizado
	Malha HPDE	PVC	PTFE	
Proteção ao sol	●	●	●	●
Proteção à chuva	X	●	●	●
Proteção ao granizo	●	●	●	●
Proteção à neve	X	●	●	●
Classificação ao fogo	Várias	Retardador de chama	Não combustível	●
Classificação ao vento (Km/h)	0-120	0-200	0-200	0-200
Anos de garantia	10+	15+	30+	10+
Reciclável	X	●	X	●

As soluções oferecidas pela empresa são designadas por *Single Bay* (Fig.2.8.a), *Double Bay* (Fig.2.8.b), *Hypar* (Fig.2.8.c) e *Mass Coverage* (Fig.2.8.d). A escolha da solução passa pelo balanceamento da área a cobrir e das condições requeridas pelo cliente.



a)



b)



c)





d)

Fig.2.8 – Solução *Architectural Car Parks*: a) *Single Bay*; b) *Double Bay*; c) *Hypar*; d) *Mass Coverage*

A solução *Single Bay* acomoda uma única fila de carros estacionados, enquanto a *Double Bay* acomoda duas filas de carros estacionados em profundidade. Geralmente, a solução *Double Bay* é usada para cobrir grandes áreas, tais como centros comerciais.

Na Fig.2.9 são apresentadas as dimensões de um módulo *Single Bay*. Esta solução abrange o mesmo vão que as soluções rígidas anteriormente apresentadas o que permite uma comparação entre estas alternativas.

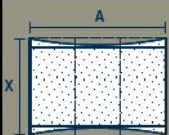
	Dimensões de estacionamento individual	Lugares de estacionamento por módulo	Profundidade X (mm)	Comprimento A (mm)	Altura máxima H (mm)	Altura da cobertura C (mm)
	2.60 x 5.50	1, 2 or 3	5500 (3-car unit)	7800 (3-car unit)	3400	2500

Fig.2.9 - Dimensões da solução *Single Bay* (adaptado)

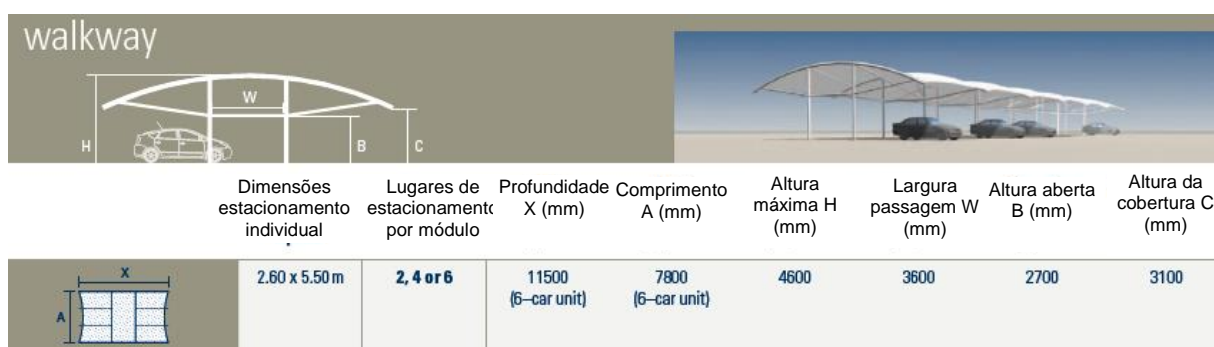
A solução *Double Bay* desdobra-se em 3 soluções estruturais diferentes: *Centre column* (Fig.2.10.a), com uma coluna central de suporte; *Walkway* (Fig.2.10.b), com corredor central; e, por último, *Perimeter columns* (Fig.2.10.c), com colunas dispostas pelo perímetro da cobertura.

A solução *Hypar* providencia grandes áreas de cobertura que incluem corredores de passagem e áreas de estacionamento. Geralmente este produto é fabricado utilizando uma malha de HDPE (polietileno de alta densidade), oferecendo proteção solar, ultravioleta e ao granizo.

A estrutura arquitetónica da solução *Mass Coverage* proporciona cobertura completa para toda a área envolvida no parque de estacionamento, incluindo as calçadas. Esta solução adequa-se a centros comerciais muito frequentados ou zonas de tráfego como em aeroportos.



a)



b)



c)

Fig.2.10 – Solução *Double Bay*, adaptado: a) *Central Column*; b) *Walkway*; c) *Perimeter Columns* (adaptado)

2.2. TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Face ao crescimento da população, as exigências energéticas têm vindo a aumentar ano após ano. As energias fósseis lideram a resposta à procura energética mundial. Contudo, é necessário apostar em soluções mais “amigas” do ambiente.

As energias renováveis ganham cada vez mais reconhecimento pela sociedade e são apontadas como uma das soluções de combate à poluição ambiental. Das energias renováveis, a mais promissora e confiável é a solar.

O processo de conversão direta da radiação em eletricidade é designado de fotovoltaico (PV). Um sistema fotovoltaico contém células que convertem a luz solar em eletricidade. Dentro de cada célula existem camadas de material semicondutor, capaz de converter a energia proveniente da radiação em corrente elétrica. Ao incidir sobre a célula, a luz cria um campo elétrico entre as camadas fazendo com

que se gere um fluxo de energia. A intensidade da luz determina a quantidade de energia elétrica que cada célula pode gerar [9]. Em Portugal, a orientação ótima de uma instalação é a direção Sul, com um ângulo de 35° de inclinação[10].

Existem atualmente diversas tecnologias e materiais para a produção de células solares. Contudo, o desafio atual é a redução do seu custo de produção e o acréscimo da sua eficiência. A tecnologia PV já reduziu o seu custo unitário para cerca de um terço nos últimos 5 anos, graças ao permanente avanço técnico que levou ao aumento da sua eficiência [9].

Atualmente, as tecnologias PV são divididas em três gerações: silício cristalino (c-Si) (1ª geração), filme fino em substrato rígido (2ª geração), outras abordagens tecnológicas (3ª geração) como, por exemplo, o filme fino em substrato flexível. As tecnologias PV de 1ª geração são as mais confiáveis e que dominam presentemente o mercado de PV. As tecnologias de 2ª geração constituem atualmente a principal alternativa à c-Si, e têm ganho participação no mercado. As tecnologias de terceira geração encontram-se em fase de desenvolvimento[11].

O material semiconductor de silício lidera na tecnologia de produção de células solares e regista a maior eficiência na produção de eletricidade. Contudo, existem diversos materiais (Fig.2.11) que podem ser uma opção rentável e adequada em certas condições de funcionamento.

A tecnologia de filme fino pode ser vista como um substituto ao silício. O baixo custo do filme fino provém do menor consumo de material e da fina espessura das camadas comparativamente às células mono e multicristalinas. No entanto, a eficiência desta tecnologia ainda é baixa.

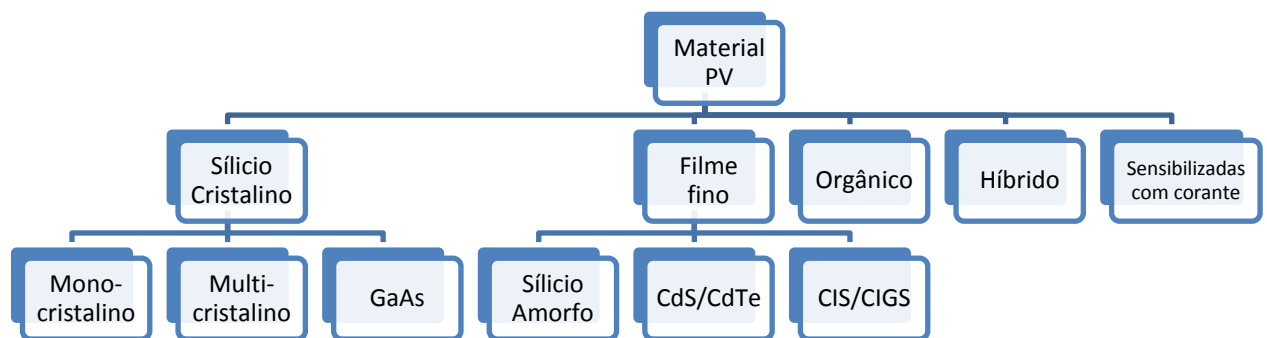


Fig.2.11 - Material PV, adaptado [9]

Existem três materiais que sobressaem na aplicação de filme fino: o silício amorfo, o CdS / CdTe (sulfeto de cádmio/telureto de cádmio) e CIS/CIGS (disseleneto de cobre, gálio e índio/ disseleneto de cobre e índio). No entanto, todos estes materiais têm um impacto negativo sobre o ambiente. Uma solução alternativa para este problema tem vindo a ser investigada e consiste no uso de polímeros orgânicos. Estes associam-se a várias vantagens, tais como o baixo custo, o reduzido peso e ao facto de não causarem tantos danos ao ambiente. Em contrapartida, têm uma eficiência muito baixa em comparação com os outros materiais, de 4 a 5% [9].

O módulo fotovoltaico é a unidade básica do sistema de geração de eletricidade. O módulo tradicional (Fig.2.12) consiste numa estrutura montada em quadro e é composto por um conjunto de células ligadas eletricamente entre si em paralelo e em série.

Por forma a proteger as células das tensões mecânicas, dos agentes atmosféricos e da humidade, estas são envolvidas num material transparente maleável, que tem ainda a particularidade de assegurar o isolamento elétrico entre as células. Para a estabilização da estrutura, o material de encapsulamento é aplicado sobre um substrato. Na maioria dos casos é usado vidro, mas também é possível usar plástico acrílico, metal ou polímeros.

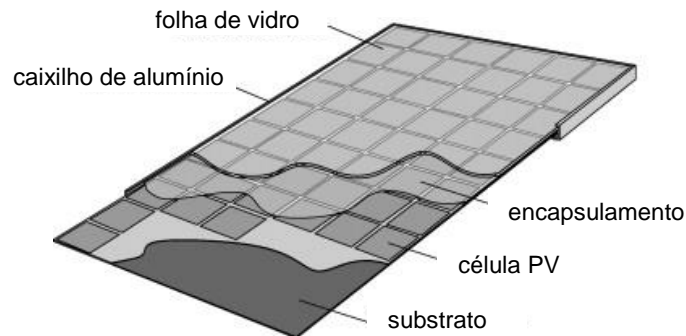


Fig.2.12 - Módulo Fotovoltaico [12]

Existem três tipos possíveis de encapsulamento [10]:

- Encapsulamento em Acetato Vinil Etileno (EVA): as fileiras de células são laminadas numa câmara de vácuo, pela aplicação de uma pressão negativa e positiva a uma temperatura crescente (processo de laminagem em vácuo). Durante este processo, o EVA derrete e circunscreve completamente as células solares. Do lado exposto ao sol é necessária uma cobertura, normalmente em vidro;
- Encapsulamento em Teflon (PTFE): as células solares são circundadas por um fluoropolímero especial (Teflon), num processo semelhante ao anteriormente descrito. Em contraste com o encapsulamento EVA, as células solares encapsuladas assentam num substrato galvanizado e não requerem outra cobertura na face frontal;
- Encapsulamento em resina fundida: recorre a um processo de fundição, no qual as células solares são fixadas entre duas folhas de vidro, através de amortecedores adesivos. A cavidade resultante é preenchida com uma resina fundida fortemente transparente.

2.2.1. MATERIAIS CRISTALINOS

De entre todos os tipos de células solares, as baseadas em silício cristalino são as que apresentam maior eficiência. O silício apresenta uma disponibilidade quase ilimitada, sendo o material mais abundante na crosta terrestre depois do oxigénio [9].

- Silício monocristalino

O silício monocristalino é o material mais utilizado na composição das células solares fotovoltaicas, perfazendo cerca de 60% do mercado. A uniformidade da estrutura molecular das células de silício monocristalino resulta da utilização de um único cristal. Esta característica potencia o seu rendimento, [10] atingindo em laboratório 25%. Contudo, em situações de comercialização, o rendimento situa-se entre 15 e 17% [9]. A produção de silício monocristalino tem um custo elevado, sendo esta a principal desvantagem deste tipo de célula fotovoltaica [10].

- Silício multicristalino

O silício multicristalino é o material mais adequado para a redução de custos na produção de células fotovoltaicas cristalinas. No entanto, a sua eficácia é baixa em comparação com as células monocristalinas, atingindo apenas 15% [9].

- Arsenieto de gálio (GaAs)

GaAs é um composto químico sintético composto por gálio (Ga) e arsênio (As), tem uma estrutura semelhante ao silício e é usado especialmente na tecnologia espacial.

Em comparação com as células solares à base de silício, o arsenieto de gálio apresenta uma eficiência mais elevada e requer uma espessura menor. As células derivadas desta tecnologia, em laboratório, conseguem uma eficiência entre 25 a 28%, podendo atingir os 30 % quando ligadas em conjunto. Além disso, o GaAs é mais leve do que as células mono e multicristalinas. No entanto, este material é bastante dispendioso [9].

2.2.2. CÉLULA DE FILME FINO

Em comparação com as células de silício cristalino, as células de filme fino têm um menor custo, uma vez que requerem menos material e implicam processos de fabricação menos onerosos [9]. A temperatura de fabrico das células de silício cristalino vai até 1500 °C, enquanto as células de filme fino apenas requerem temperaturas situadas entre 200 e 500 °C. Os menores consumos de materiais e de energia, assim como a elevada capacidade de automatização da produção em larga escala, oferecem um potencial considerável para a redução dos custos de produção, quando comparada com a tecnologia de produção do silício cristalino [10]. No contexto PV, o filme fino caracteriza-se por uma espessura entre 10nm e 10µm [13].

Apesar de apresentarem uma baixa eficiência, a quantidade de energia produzida em determinadas condições pode ser bastante considerável. As células de filme fino oferecem um maior aproveitamento para baixos níveis de radiação e para radiações do tipo difusa. Para além disso, o coeficiente de temperatura é mais favorável, isto é, a deterioração do desempenho para elevadas temperaturas é menor do que a que se verifica com outras tecnologias.

Outra vantagem das películas finas resulta da sua forma celular (longas e estreitas fitas), conferindo-lhes uma menor sensibilidade aos efeitos de sombreamento. No caso de um módulo cristalino, um pequeno objeto, tal como uma folha de árvore, pode cobrir completamente a célula cristalina. No caso do módulo de filme fino, essa folha poderá cobrir várias células ao mesmo tempo, ficando no entanto apenas uma pequena área de cada uma destas células efetivamente sombreada [9].

Devido à reduzida espessura do material semiconductor, esta tecnologia permite o fabrico de células solares flexíveis em substrato maleável [10]. O tradicional painel pode ser substituído por um mais fino e flexível (Fig.2.13) graças à implementação de polímeros que envolvem e protegem as células solares. Atualmente várias investigações são levadas a cabo para testar a compatibilidade dos polímeros neste contexto [12].

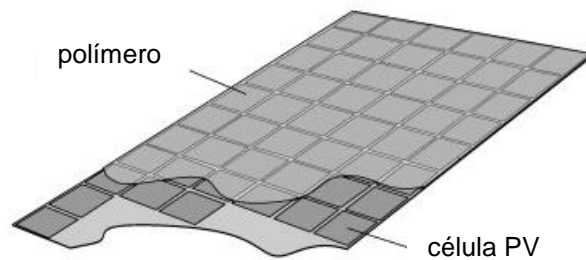


Fig.2.13 - Células PV em polímeros [12]

- Silício amorfo (a-Si)

O silício amorfo é o material mais utilizado na tecnologia de película fina, por ser o que permite alcançar maior eficiência. As células de silício amorfo não possuem uma estrutura cristalina e têm uma taxa de absorção da luz 40 vezes maior do que as células de silício monocristalino [9].

- Telureto de cádmio (CdTe) e sulfeto de cádmio (CdS)

O telureto de cádmio e sulfeto de cádmio podem originar uma eficiência elevada, até 15%. Esta tecnologia é conhecida pela sua estabilidade e durabilidade [9].

A escassez do telúrio é um impedimento a uma maior difusão desta tecnologia. É considerada um risco a aposta no desenvolvimento destas células, devido à expectativa de aumento de custo deste material [11].

- Disseleneto de cobre, gálio e índio/ Disseleneto de cobre e índio (CIGS/CIS)

Este material ainda se encontra em fase de desenvolvimento, uma vez que é uma tecnologia nova. Contudo, está direcionado para competir com as células de silício. Já se registou uma eficiência de 13% para os módulos PV e 20% para a célula PV [9].

Estas células não são suscetíveis de se degradarem com a indução da luz. Contudo, apresentam problemas de estabilidade em ambientes quentes e húmidos, pelo que se deve garantir uma boa selagem [10]. Mais uma vez o desenvolvimento destas células tem sido travado pela escassez dos materiais usados [11].

2.2.3. CÉLULAS E POLÍMEROS ORGÂNICOS

A célula solar orgânica (OPV) é uma tecnologia recente e ainda em fase de desenvolvimento. Mesmo com uma eficiência muito baixa, de cerca de 3-5%, as vantagens da flexibilidade mecânica, da descartabilidade e da relação custo-eficiência trouxeram muito interesse a este material.

Gorter et al. [9] conceberam um estudo que aponta alguns polímeros com elevado potencial para, no futuro, substituir os módulos PV de silício, considerando a redução de custo e peso. A maior parte dos materiais orgânicos admitem baixas tensões de circuito aberto, sendo a máxima alcançada de 4 V. Este ainda é um aspeto que requer desenvolvimento e inovação para que esta tecnologia tenha uma aplicação mais ampla.

Várias soluções de filme fino flexível têm sido abordadas através desta tecnologia. Serão reportados exemplos de aplicações já existentes e os seus requisitos na secção 2.3.2.

2.2.4. CÉLULA SOLAR HÍBRIDA

Normalmente, a ideia de híbrido remete-se à combinação de silício cristalino com silício não cristalino. Um dos maiores fabricantes de células solares do Japão, *Sanyo*, desenvolveu uma célula solar híbrida com eficiência de 21% [9].

Estas células não apresentam degradação da eficiência devido ao fenómeno de envelhecimento por indução da luz, como é característico das células amorfas de filme fino. Comparadas com as células solares cristalinas, a célula híbrida distingue-se pela maior produção de energia a elevadas temperaturas [10].

2.2.5. CÉLULAS SENSIBILIZADAS COM CORANTE

Devido a alguns problemas de eficiência, custos de produção e questões ambientais associados aos materiais tradicionais, alguns investigadores produziram um novo material designado por *Dye-sensitized solar cell* [9]. O material básico da célula é o semiconductor dióxido de titânio (TiO_2).

A característica única do conceito da célula sensibilizada com corante, é que a absorção da luz e o transporte da carga ocorrem em materiais diferentes. Os materiais utilizados não são tóxicos e a sua produção é económica. O dióxido de titânio é produzido em grandes quantidades na indústria e os materiais dispendiosos, como a platina e os corantes estáveis, são apenas precisos em proporções reduzidas. Contudo, existem ainda sérios problemas que devem ser resolvidos, particularmente em termos da estabilidade a longo prazo e na selagem.

Até ao momento, as pequenas células testadas em laboratório alcançaram uma eficácia de 12 % mas, na prática, só atingiram 5%. Em contraste com as células cristalinas, a sua eficiência cresce com o aumento da temperatura. As células sensibilizadas com corantes oferecem novas possibilidades graças à sua flexibilidade [10].

Em resumo, na tabela 2.2 são apresentadas as gamas de eficiência de alguns tipos de células e a área de captação necessária para se obter a mesma produção energética. Na prática, a menor eficiência dos módulos de película fina, leva à exigência de uma maior área de captação. Contudo, isto não implica uma menor energia produzida por unidade de potência.

Tabela 2.2 - Eficiência de células solares e módulos, adaptado de [14]

Tecnologia	Silício Cristalino		Filme Fino			
	Mono	Multi	a-Si	CdTe	Cl(G)S	OPV
Eficiência da célula	13-21 %	14-17 %	5-7 %	8-11%	7-11%	3-5 %
Eficiência do módulo	13-21 %	12-16%				
Área necessária por KW (para módulos)	~ 7 m ²	~ 8 m ²	~ 15 m ²	~ 11 m ²	~ 11 m ²	~ 30 m ²

2.3. APLICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM PARQUES DE ESTACIONAMENTO

De forma a rentabilizar a estrutura de um parque de estacionamento, é possível agregar um sistema fotovoltaico para produção de energia elétrica através de aproveitamento solar.

Associada a esta solução existem inúmeras vantagens, tais como: a rentabilização da solução; um retorno financeiro do investimento; contribuição para a redução da emissão de poluentes atmosféricos; e, no caso de uma empresa, a associação de uma imagem “verde”.

As coberturas dos parques de estacionamento são locais propícios à colocação de sistemas de aproveitamento solar, devido às amplas áreas e à exposição solar a que estão sujeitas.

2.3.1 SISTEMAS RÍGIDOS

Neste sistema, a cobertura é efetuada por módulos fotovoltaicos, podendo estes estar incorporados na cobertura ou constituir eles próprios a cobertura. Pretende-se que a solução implementada seja o mais simples e prática possível e permita o máximo aproveitamento solar. Os módulos fotovoltaicos mais empregues neste tipo de solução, são os cristalinos de silício, embora já existam várias aplicações em filme fino. Na tabela 2.3 são indicados alguns produtores de sistemas deste tipo.

Um exemplo de incorporação de um sistema fotovoltaico na cobertura, é a solução *Car Schell Energy Flex* (Fig.2.14), da empresa GreenPark. Dimensionado para suportar as cargas do vento e da neve, este sistema conjuga uma estética urbana com eficiência estrutural.



Fig.2.14 - *Car Schell Energy*, GREENPARK

Cada módulo abriga 2 ou 3 carros e a cobertura tem uma área de 6 x 5 metros quadrados. A junção de módulos permite a constituição de soluções completas. As fundações são efetuadas por parafusos que ancoram a placa na base, não necessitando de trabalhos árduos nem demorados. A solução inicial contém 28 painéis fotovoltaicos flexíveis de silício amorfo com uma potência de 30KW. A estrutura de suporte é efetuada em aço galvanizado e a cobertura em painéis de pinho revestidos a poliéster, que dão apoio aos painéis PV [15].

Tabela 2.3 - Fornecedores de sistemas rígidos com sistema fotovoltaico

Fornecedor	País	Material de suporte estrutural	Referência
Belectric	Alemanha	*	http://www.belectric.com
Carport Structures	USA	Aço	http://www.carportstructures.com/
Duo-Gard	USA	Aço galvanizado	http://www.duo-gard.com/
ElectroPort	Reino Unido	Aço galvanizado	http://www.infiniteenergy.co.uk/carport-solar-canopy.asp
Energyparking	Itália	*	http://www.energyparking.it/
Enviromena	Abu Dhabi	*	http://www.enviromena.com/
EnvisionSolar	USA	Aço Galvanizado a quente	http://envisionsolar.com/
Far Systems	Itália	*	http://www.farsystems.it
Giulio Barbieri	Itália	Alumínio	http://www.giuliobarbieri.it/
Green Coast Solar	USA	Aço	http://greencoastsolarsystems.com/
GreenPark	Itália	Aço galvanizado	http://www.greenparksrl.it/
Martifer	Portugal	Aço leve	http://www.martifer.pt/
MecoSun	França	Aço galvanizado	http://www.mecosun.fr/fr/
Mp-tec	Alemanha	Aço	http://www.mp-tec.pt/Servicos.htm
OnyxSolar	USA	Madeira	http://www.onyxsolar.com/
Orion Solar	USA	Aço Galvanizado a quente	http://www.orionsolar.com.au/
Schletter	Alemanha	Aço galvanizado e alumínio	http://www.schletter.de/
Selvoline	Itália	Aço galvanizado	http://www.selvoline.com/selv/site/home.asp
Solaire Generation	USA	Aço	http://www.solairegeneration.com/
Solar Cube	Alemanha	Aço galvanizado	http://www.solarcube.com/
SolEvo	Reino Unido	Aço galvanizado	http://www.sol-evo.com/
Sunvie	França	Madeira Laminada e Aço	http://www.sunvie.eu/
The Solar Electricity Company	USA	*	http://www.thesolarelectricitycompany.com/

* material não especificado pelo fornecedor

2.3.1.1. SOLUÇÃO SMARTPARK

O *SmartPark* [16] é uma solução apresentada pela Martifer Solar. O produto consiste numa estrutura fixa que substitui o estacionamento externo coberto. Esta estrutura, que requer pouco trabalho de construção civil, é projetada para ser coberta com painéis fotovoltaicos. Os cabos elétricos são conduzidos pelo interior e conectados aos inversores necessários para transformar um espaço ensolarado e, normalmente desperdiçado, numa fonte de geração de energia fotovoltaica.

A estrutura metálica é formada por perfis em aço leve, da Constálica, e o sistema modular é da responsabilidade da MPrime [17]. Os painéis fotovoltaicos são rígidos e contêm células multicristalinas de silício. Conforme a potência pretendida, existe uma ampla gama de opções.



Fig.2.15 – Solução *SmartPark*

O *Smartpark* é um produto com uma imagem arquitetónica cuidada que integra a tecnologia *plug and play*. Conforme o local de implementação, é otimizado para os novos requisitos sendo a solução modular personalizável pelo cliente.

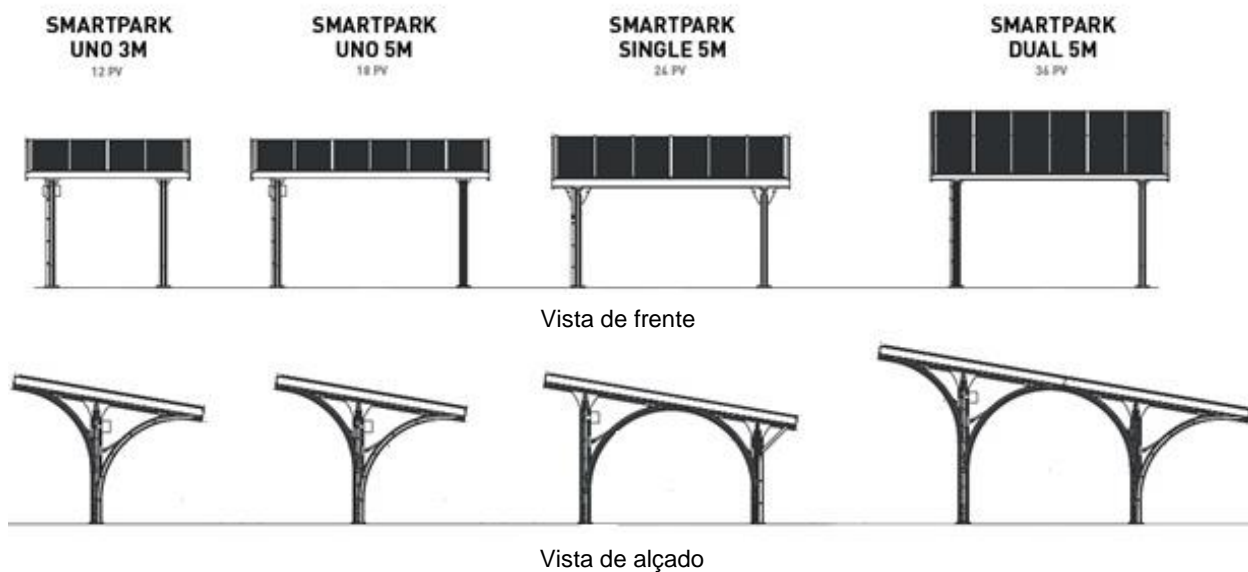


Fig.2.16 - Tipologias da solução *SmartPark*

Na Fig.2.16 são ilustrados 4 tipos de soluções comercializadas pela Martifer Solar. O *Smartpark Uno* 3 m permite o estacionamento de 1 carro, apoia 12 painéis PV e vence um vão de 3 metros. As restantes soluções são projetadas para vencer vãos de 5 metros. A solução Uno 5 m abriga 2 carros e apoia 18 módulos PV, a opção Single 5 m também alberga 2 carros mas apoia 24 módulos PV e por último, o Dual 5 m abriga 4 carros e apoia 36 módulos PV.

2.3.2. SISTEMAS FLEXÍVEIS

Ao combinar um sistema fotovoltaico flexível com uma estrutura em membrana tensa, é possível gerar eletricidade e ao mesmo tempo usufruir de uma estrutura útil. Os painéis fotovoltaicos tradicionais não são utilizados devido ao seu peso ser incompatível com a estrutura.

Um mercado adicional foi iniciado quando a tecnologia de filme fino PV foi estendida aos painéis, em substrato flexível[13].

A substituição do substrato de vidro por um material alternativo acarreta consequências no desempenho do painel PV. O rendimento é inferior, em comparação com os resultados do substrato de vidro, tanto para o processo a baixa temperatura, em polímeros, como no processo de alta temperatura, sobre substratos metálicos. Embora haja várias questões a discutir e melhorar, esta solução torna-se atrativa pelo baixo peso, custos aceitáveis e flexibilidade[18].

Polímeros conjugados constituem uma alternativa atraente para os tradicionais sistemas fotovoltaicos de silício, porque são fortes absorventes da luz visível e podem ser depositados sobre substratos flexíveis com grandes áreas, utilizando técnicas de processamento tais como “roll-to-roll”, técnica semelhante à de produção de jornal através de rolos, ou impressão[19].

Em comparação com os módulos cristalinos, os módulos de filme fino comportam-se melhor na presença de sombras. As células de filme fino absorvem melhor os comprimentos de onda curto e médio do espectro da radiação visível, do que as células cristalinas. Esta resposta espectral permite que as células de filme fino tenham um melhor desempenho para baixos níveis de radiação solar[10].

Apesar de já existirem algumas aplicações conjuntas de membranas tensas com filme fino, ainda existem alguns problemas na sua aplicabilidade. Um deles, é a forma como se integra o sistema fotovoltaico na membrana. Presentemente, são utilizadas técnicas de colagem [20], de colocação em bolsas [21] e estão a ser desenvolvidos estudos em que o material fotovoltaico é depositado diretamente na membrana [12].

Na tabela 2.4 são apresentadas duas soluções atuais do sistema de cobertura flexível. A empresa SkyShades já comercializa o seu produto enquanto a Hightex ainda está a desenvolver o produto, existindo apenas pequenas e limitadas aplicações disponíveis.

Tabela 2.4 - Sistemas flexíveis com sistema fotovoltaico

Fornecedor	País	Tecnologia PV	Material PV
Sky Shades	Reino Unido	Orgânico	Konarka
Hightex	Alemanha	Silício amorfo	SolarNext

Os painéis fotovoltaicos tradicionais têm de ser montados acima do telhado para uma eficiência máxima. Por requerem luz solar direta para gerar energia, estes têm de ser configurados de modo a não

serem sombreados e a não intercederem com a luz solar direta. Outra limitação, é a de que, em dias nublados, a potência de saída é desprezável. Além disso, para obter a potência máxima, estes painéis devem ser instalados orientados para sul. Por todas estas razões, a área do telhado a ser utilizada para a conversão de energia solar é limitada. Em contraste, os painéis OPV não são restringidos por sombras nem pelo ângulo do sol direto. A eficiência de painéis OPV é relativamente constante durante o dia [14].

Na tabela 2.5 estão indicados alguns produtores de filme fino flexível. Como já foi referido, a Konarka e a SolarNext já implementaram o filme fino em estruturas de membrana.

Tabela 2.5 – Produtores de filme fino flexível

Empresa	Site	País
First Solar	http://www.firstsolar.com/	Alemanha
SolarNext	http://www.solarnext.eu	Alemanha
Power Film Solar	http://www.powerfilmsolar.com/	Estados Unidos
Silicon Solar	http://www.siliconsolar.com/	Estados Unidos
SoloPower	http://solopower.com/	Estados Unidos
Konarka	http://www.konarka.com/	Estados Unidos

2.3.2.1. Solução Skyshades

A SkyShades [21] é uma empresa especializada na produção e execução de estruturas em membrana tensa. A área de aplicação é ampla, passando por estádios, parques de estacionamento, parques de diversão, hotéis e mesmo edifícios emblemáticos.

As membranas comercializadas atualmente podem ser de polietileno de alta densidade (HDPE), policloreto de vinilo (PVC), fluoreto de polivinilideno (PVDF), politetrafluoretileno (PTFE) e por último etileno tetrafluoroetileno (ETFE). As mais utilizadas são as de PVC e de PTFE.

A empresa Konarka não cria produtos finais para o mercado, mas faz parcerias com as empresas, permitindo que estas integrem células solares nos seus produtos. Um exemplo disso, é a colaboração com a SkyShades, de onde resultou a integração de filme fino orgânico em membranas tensas que servem de cobertura a parques de estacionamento.

Na Fig.2.17 encontram-se algumas opções da estrutura em membrana que pode integrar os módulos de filme fino, bem como um exemplo real na Flórida, USA.



Fig.2.17 – Estruturas de estacionamento baseadas na utilização de membranas tensas - Soluções SkyShades [21]

A membrana tem “bolsos” soldados (Fig.2.18), que permitem segurar e proteger o filme fino. Com este processo, não há transferência de tensões para o filme fino. Contudo, há um acréscimo de gasto de material para a criação dos “bolsos”. Outra vantagem neste processo, é o facto de se poder substituir as tiras PV sempre que necessário, de forma rápida e sem trabalhos demorados. Sabendo que as membranas têm uma vida útil superior à do filme fino orgânico, esta característica é relevante.



Fig.2.18 – “Bolsos” soldados para inserção de filme fino

A companhia Konarka é reconhecida como sendo a líder da tecnologia fotovoltaica orgânica (OPV) (Fig. 2.19). O desenvolvimento do *Power Plastic* é baseado na tecnologia OPV e é produzido a partir de materiais recicláveis. Tem como características ser fino, leve e flexível. Em 2011, este filme fino conseguiu atingir um rendimento de aproximadamente 8%, valor que tem vindo a aumentar anualmente graças ao desenvolvimento desta tecnologia. Este material pode ser impresso ou revestido de forma barata em substratos flexíveis usando a técnica *roll-to-roll*.

A tecnologia fotovoltaica orgânica constitui uma opção rentável devido à sua fraca dependência do ângulo de incidência do sol. Isto significa que os painéis solares são capazes de recolher a energia em vários locais e situações, tanto com iluminação direta, bem como em situações de iluminação indireta.

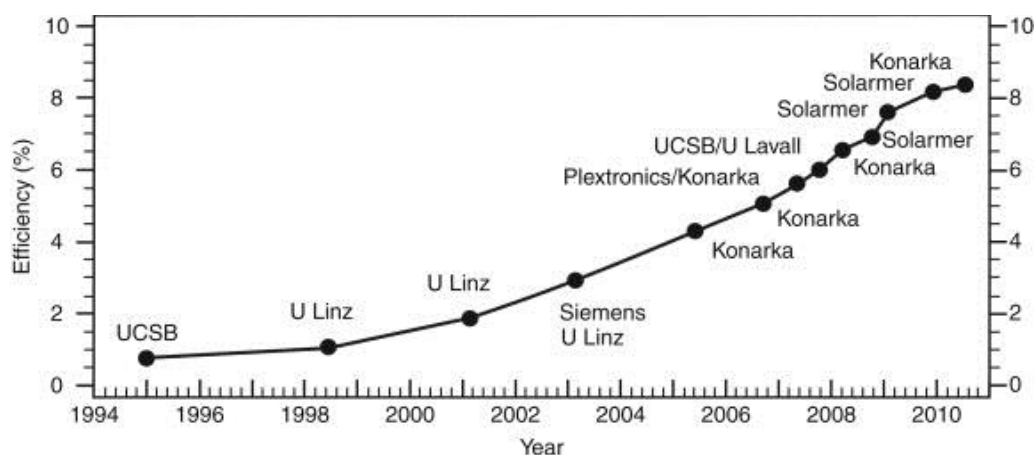


Fig.2.19 – Eficiência de OPV [22]

2.3.2.2. Solução Hightex

A empresa Hightex [23] construiu nas últimas décadas centenas de estruturas de membrana em todo o mundo, pequenas, grandes, simples, complexas, permanentes ou temporárias. Oferece uma vasta gama de serviços, adaptando e personalizando o projeto pretendido. Através da nova geração de células solares de película fina altamente flexíveis, juntamente com a empresa SolarNext, conjugou-se a tecnologia PV com estruturas em membrana.

Num processo de laminação em grande escala, a folha de substrato revestido é encapsulada com duas camadas de fluoropolímero. Uma característica deste material, é a autolimpeza, atenuando a manutenção futura da estrutura. O processo de laminação é muito simples e pode ser realizado de diversas maneiras, utilizando equipamentos económicos. Consiste no princípio básico de juntar duas linhas da trama, por aplicação de pressão, à medida que são alimentadas entre os dois rolos. A elevada transmissão de luz do encapsulamento com fluoropolímero assegura uma grande produção de energia das células fotovoltaicas. O grau de sombreamento é dependente do material de membrana escolhido.

A tecnologia PV utilizada é o filme fino em silício amorfo, produzidos num processo contínuo de *roll-to-roll*. A largura da película fotovoltaica é de 30cm e o comprimento máximo de 3m.

Os PV flexíveis podem ser usados como uma única camada, em telhados ou fachadas, sem uma estrutura de suporte adicional. As coberturas tradicionais podem ser substituídas por uma camada em almofada pneumática (Fig.2.20). Os elementos fotovoltaicos neste contexto servem para gerar eletricidade, mas também proporcionar sombra, parcial ou total.



Fig.2.20 - Estrutura em membrana pneumática

A utilização de polímeros tornou-se uma opção económica, dada a elevada velocidade de deposição de PV no substrato em comparação com a dos materiais alternativos, tais como vidro ou folha de metal. Isto, por sua vez, implica que, durante o processo, a temperatura seja moderada. Caso contrário, ocorrerá inevitavelmente uma distorção termicamente induzida no material de substrato, o que constitui um obstáculo adicional.

Existem duas aplicações possíveis das células PV flexíveis: em membranas PTFE/fibras de vidro; em membranas ETFE.

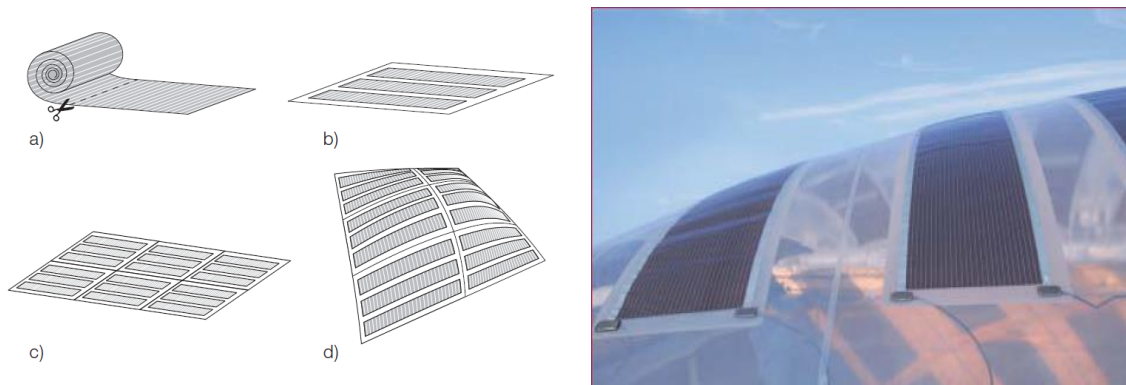


Fig.2.21 - PV flexíveis em membranas ETFE

Na aplicação em membranas de ETFE (Fig.2.21), os rolos fotovoltaicos são cortados em comprimento, alinhados e unidos para formar laminados que atendem às necessidades específicas de cada projeto. A membrana fotovoltaica é então alojada entre duas camadas de diferentes espessuras de ETFE. Este processo de laminação assegura que as células fotovoltaicas são eficazmente protegidas contra as cargas e tensões, bem como contra a humidade e às condições atmosféricas.

O processo de aplicação de células PV flexíveis em membranas de PTFE/fibras de vidro (Fig.2.22) é semelhante ao descrito para as membranas em ETFE. Contudo, estas últimas são mais utilizadas como membranas estruturais, sendo a disposição e a integração das lâminas de PV diferente.

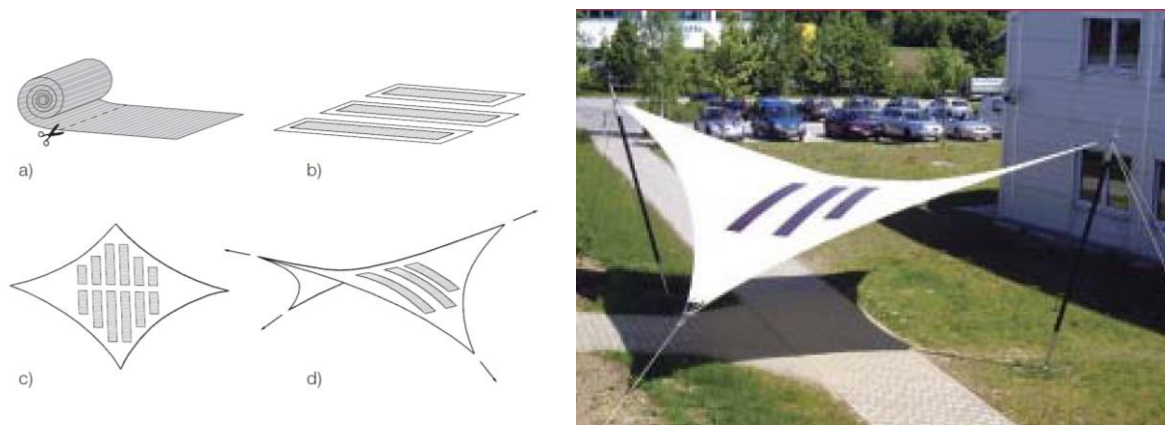


Fig.2.22 - PV flexíveis em membranas em PTFE

No presente, o tamanho dos módulos é ainda limitado pelas dimensões do equipamento de laminação disponível (aproximadamente 3x1,5 m). Dependendo se eles são utilizados em telhados ou fachadas, numa única camada de construção, ou como parte de uma almofada de membrana de múltiplas camadas, as lâminas individuais podem ter que ser unidas para formar áreas maiores.

A estimativa do rendimento de um sistema fotovoltaico incorporado numa estrutura de membrana é um processo muito mais complexo do que para módulos fotovoltaicos convencionais. As razões para tal devem-se à difícil uniformização de projetos, à inclinação variável dos fotovoltaicos e à difícil estimativa de sombreamento.

2.3.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E CAPACIDADE DE PRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em sistemas ligados à rede e em sistemas autónomos. No último caso, o aproveitamento da energia solar é ajustado à procura energética. Geralmente, a energia produzida não corresponde à procura pontual de energia por parte do consumidor, pelo que se torna obrigatório considerar um sistema de armazenamento (baterias) e meios de apoio complementares de produção de energia [10].

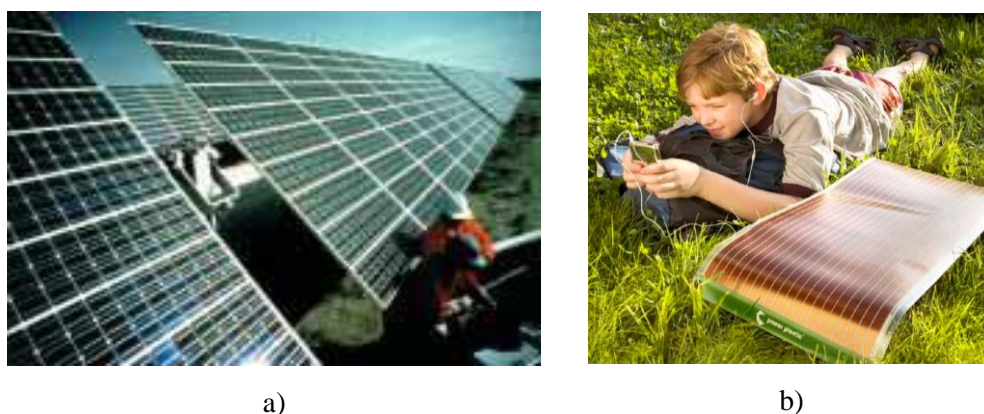


Fig.2.23 - Sistemas fotovoltaicos: a) ligado à rede; b) autónomo

No caso de sistemas com ligação à rede, a rede pública de distribuição de eletricidade opera como um acumulador de energia elétrica. Contrastando com o caso Português, em alguns países, como é o caso da Alemanha, a maioria dos sistemas fotovoltaicos encontram-se ligados à rede. Nestes sistemas, a

totalidade da energia produzida é injetada na rede pública de distribuição de energia elétrica, gerando uma receita adicional, que é conseguida pela faturação, com a taxa em vigor, de cada unidade de energia elétrica produzida [10].

A tecnologia da empresa Konarka, *Power Plastic*, é muito utilizada em sistemas autônomos. Em 2010, a empresa forneceu uma estimativa do tempo necessário de carga para vários aparelhos, tendo em conta a tecnologia selecionada. Como se pode concluir a partir da tabela 2.6, quanto maior a área do filme fino menor é o tempo de carga dos aparelhos. Contudo, esta tecnologia não é adequada para grandes aproveitamentos, pois é necessária uma grande área para se obter energia elétrica significativa [14].

Tabela 2.6 – Tempo de carga de um aparelho em função da tecnologia fotovoltaica OPV, adaptado de [14]

	<i>Power Plastic</i>					
Tempo de carga (horas)	120	220	320	420	520	620
IPHONE 3G (1500 mAh)	7.4 – 8.5	3.7 – 4.5	2.5 - 3.5	1.9 – 2.8	1.5 – 2.5	1.1 – 2.0
Blackberry (1600 mAh)	7.9 – 9.0	3.9 – 4.7	2.6 – 3.5	2.0 – 2.8	1.5 – 2.5	1.2 – 2.1
IPOD Nano (800 mAh)	3.9 – 5.0	2.0 – 3.0	1.3 – 2.5	1.0 – 2.0	0.5 – 1.0	0.6 – 1.0
Aparelho GPS (2000 mAh)	9.8 – 12.0	4.9 – 6.0	3.3 – 4.0	2.5 – 3.5	2.0 – 2.5	1.3 – 2.2
Bateria 1800 mAh	8.9 – 11.0	4.4 – 5.5	3.0 – 3.7	2.2 – 3.0	1.8 – 2.5	1.3 – 2.2
ipad (6250 mAh)	30.8 – 36.0	15.4 – 18.0	10.3 – 12.0	7.8 – 10.0	6.3 – 8.0	5.2 – 7.0

Consequentemente, a tecnologia, baseada em filme fino orgânico, adequa-se a sistemas autônomos, sem necessidade de grande produção de energia elétrica. No caso de parques de estacionamento, esta tecnologia será capaz de fornecer eletricidade limitada, sendo possível o fornecimento de eletricidade para o próprio sistema de iluminação ou para o carregamento de baterias de carros elétricos.

Os sistemas em filme fino com silício amorfo, como os apresentados pela *SolarNext*, além de serem mais eficientes, necessitam de uma menor área para produzir a mesma quantidade de energia que fotovoltaicos orgânicos. Dependendo da área disponível podem ser projetados sistemas ligados à rede ou sistemas autônomos [20]. Os sistemas fotovoltaicos aplicados em parque de estacionamento, como os aplicados no *SmartPark*, que envolvem tecnologia cristalina, permitem sistemas fotovoltaicos ligados à rede, bem como, o fornecimento de energia necessária para as funções do parque (iluminação, carga de baterias). De uma forma simplificada, estas soluções podem ser comparadas pela potência em condições idealizadas, Wp (watt-pico). Enquanto o sistema fotovoltaico em silício amorfo produz entre 45 a 60 Wp/m² [20], os sistemas em tecnologia cristalina atingem os 145 a 155 Wp/m² [16]. Esta é uma das razões por qual, os sistemas em tecnologia cristalina dominam as aplicações fotovoltaicas.

3

ESTRUTURAS EM MEMBRANA TENSA

As estruturas em membrana empregues em coberturas podem constituir uma solução economicamente viável devido às suas características, possibilitam a utilização de pré-fabricados e baseiam-se em estruturas de suporte simples aliadas a formas esteticamente agradáveis.



Fig.3.1 – Parque Mercedes Benz, Alemanha [24]

As estruturas em membrana são formadas por elementos estruturais tracionados biaxialmente. Este sistema construtivo é formado principalmente por uma membrana estrutural flexível e um sistema de suporte. As membranas resistem às ações exteriores graças à sua forma, às suas características físicas e ao pré-esforço.

Atualmente, não existe regulamentação específica para fundamentar um projeto de membrana tensa. Existem normas e regulamentos nacionais. Contudo, estes são incompletos, válidos apenas em domínios muito específicos e elaborados para sistemas estruturais diferentes do pretendido.

O Eurocódigo 1, respetivamente nas partes 1.3 e 1.4 sobre cargas de neve e vento, não considera as formas curvas complexas de uma estrutura em membrana tensa. A norma alemã DIN 4134 fornece apenas orientações mínimas para estruturas de suporte de ar. A DIN 4112 faz referências a estruturas temporárias tracionadas, mas não em detalhe. A empresa Bureau Veritas (França) elaborou um conjunto de recomendações para estruturas permanentes tracionadas, publicadas em *Annales du bâtiment et des Travaux Publics*.

Com o objetivo de reunir a informação existente relacionada com as estruturas de membrana, foi criado o guia *European Design Guide for Tensile Surface Structures* [24]. Este não pretende ser uma norma europeia, mas um estado de arte que ajudará na criação desta. O corrente capítulo é redigido tendo em conta este documento e a tese de mestrado do Mestre Pedro Ferreira, *Análise e dimensionamento de uma estrutura de cobertura em membrana tensa* [25].

A forma e o comportamento físico das estruturas em tecido são diferentes das estruturas rígidas convencionais. Os projetistas preocupam-se principalmente com três fatores estruturais - a escolha da forma da superfície, os níveis de pré-esforço e a deformação da superfície.

A geometria da superfície de uma membrana não é definida numa base matemática de uma superfície de revolução, mas sim através do equilíbrio interno do pré-esforço dentro de um limite pré-determinado pelo sistema de apoio.

Normalmente, utiliza-se a analogia física da película de sabão para compreender o funcionamento ótimo de um sistema. O filme de sabão apenas se forma dentro de um limite geométrico, que permite o equilíbrio à tração entre as moléculas do filme. É gerada assim uma superfície com área mínima, num estado de tensão homogêneo e isotrópico, conduzindo a uma energia potencial mínima.

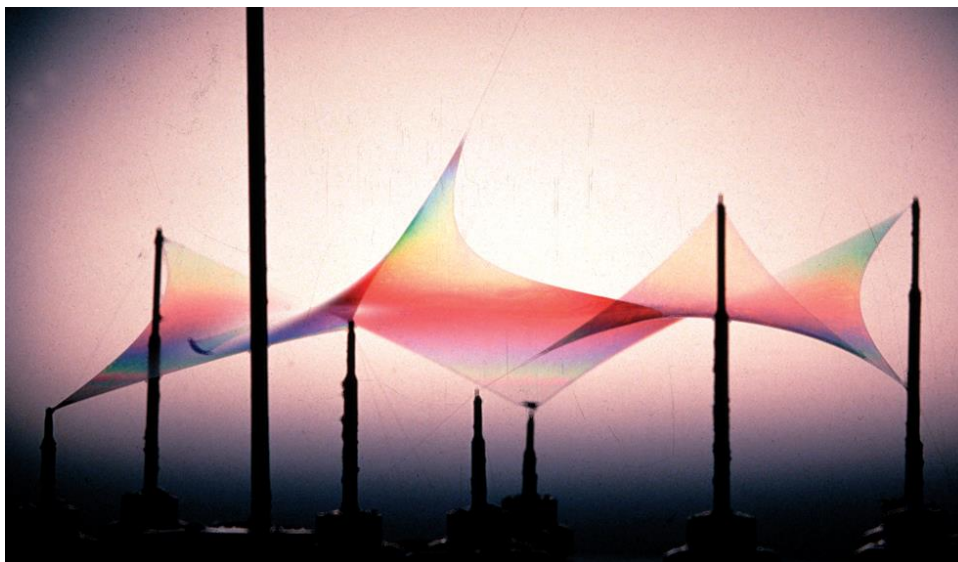


Fig.3.2 - Estudo de área mínima com película de sabão [24]

Para condições de fronteira definidas num dado plano, a superfície mínima resultante é também plana. No entanto, assim que um único ponto da superfície da membrana ou da sua fronteira sai desse plano, a superfície mínima resultante possui dupla curvatura em todos os pontos.

O pré-esforço contribui significativamente para a rigidez, restringindo graves deformações típicas de planos ou superfícies curvas, tal como nas membranas. O nível de pré-esforço a introduzir deverá ser definido de tal forma que seja suficientemente baixo para reduzir o trabalho realizado durante a instalação e, ao mesmo tempo, suficientemente elevado para garantir uma pré-tensão após as perdas devido à fluência do material da membrana ao longo do tempo.

A deformação da superfície da membrana é benéfica, desde que, a superfície deformada devido à carga permaneça com inclinação positiva. O problema associado a gradientes baixos é a possibilidade da acumulação de neve/gelo (*ponding*), que pode causar uma depressão com danos irreversíveis.

As estruturas em tecido encontram-se em quase todas as zonas climáticas do mundo e servem uma ampla gama de funções. Os materiais de membrana vulgarmente utilizados, tais como poliéster revestido a PVC e fibras de vidro revestidas a PTFE, refletem tipicamente cerca de 75% da energia solar incidente, absorvem 17% e transmitem a restante. As estruturas em membrana consideram-se assim apelativas para coberturas em zonas áridas e tropicais.

O projeto de estruturas em membrana é caracterizado pela grande interdependência entre a sua forma e o seu estado de tensão. Assim sendo, o projeto envolve três etapas (Fig.3.3): determinação da forma (*form-finding*); definição dos padrões de corte (*cutting-pattern*); e análise da resposta a carregamentos.

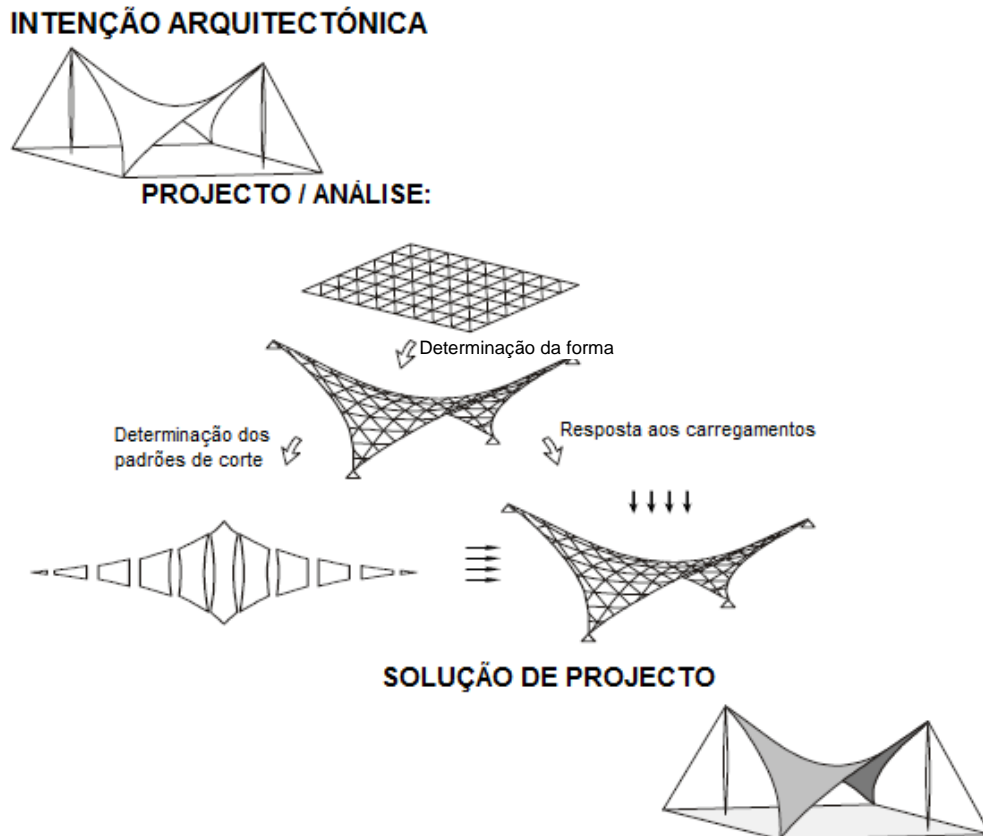


Fig.3.3 – Fases de projeto de uma estrutura em membrana tensa [26]

A etapa da determinação da forma envolve a geração de uma geometria estrutural inicial, que equilibra o estado de deformação para as forças de pré-esforço inicial, de modo a satisfazer as condições de fronteira impostas. A resposta ao carregamento compreende a análise do comportamento da estrutura (definida no processo de determinação da forma), devido aos vários carregamentos possíveis, como por exemplo, os carregamentos devidos à ação do vento e neve, de forma a garantir a segurança do sistema. A determinação dos padrões de corte consiste na delimitação aproximada de um conjunto de peças planas feitas de tecido, e que espacialmente serão unidas para formar a superfície determinada no processo de determinação da forma, ou seja, a membrana.

As estruturas em membrana tensa são utilizadas numa ampla gama de construções com variados fins, adquirindo uma classificação de acordo com diferentes aspetos, tais como, a função do edifício, as funções da própria membrana (transmissão da luz, proteção contra a chuva e sol, entre outros), se é conversível ou não, o vão em questão e a duração de utilização.

Na Fig.3.4 é apresentada uma classificação de estruturas de membrana, tendo em conta a sua tipologia estrutural. A maioria das estruturas em membrana tensa pertence à categoria aberta. Tais estruturas oferecem proteção contra as condições atmosféricas e em simultâneo preservam a sensação de um espaço aberto. Nas estruturas fechadas, a envolvente exterior oferece proteção contra condições atmosféricas adversas (vento, chuva ou sol intenso), ao mesmo tempo isola um determinado espaço. As estruturas conversíveis são construídas de maneira a que a sua forma possa ser alterada, com a frequência necessária, em relativamente pouco tempo. As membranas tensas são particularmente adequadas para este fim devido às suas propriedades.





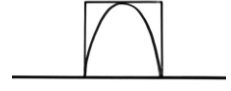
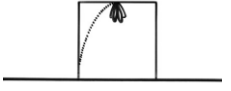
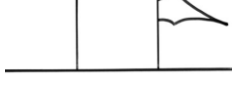
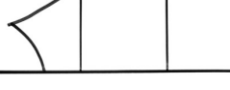
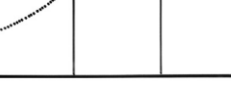
	Aberta	Fechada	Conversível
Envolventes			
Interiores			
Acopladas			

Fig.3.4 – Classificação das estruturas em membrana tensa

3.1. SISTEMA ESTRUTURAL

Uma vasta diversidade de estruturas em membrana é realizada atualmente, sendo estas compostas, na grande maioria, por uma estrutura de cabos e uma membrana. Toda a estrutura é constituída por um conjunto de elementos resistentes, com diferentes materiais, tipos de fabricação e geometria. Distinguem-se geralmente dois tipos de elementos: de superfície e de bordo. Além da resistência requerida, estes elementos têm de garantir estanquidade às condições climatéricas, proteção contra ataques químicos e biológicos, bem como não serem inflamáveis.

A membrana é um elemento de superfície que funciona de forma bidimensional. Os elementos resistentes ao carregamento linear, como os cordões, encaminham as forças ao longo dos bordos da membrana. Os elementos resistentes transferem a carga através de forças de tração. As membranas são formadas por materiais dotados de elevada resistência axial e baixa, ou quase nula, rigidez de flexão.

Atualmente, dois grupos de materiais são utilizados em elementos de superfície: tecido revestido com manufatura sintética e fibras na sua composição, designados por têxteis técnicos; ou polímeros de fluorocarbono, como películas extrudidas, designados por plásticos técnicos (*foils*).

Os cabos, as fitas têxteis e as cordas *keder* são exemplos de elementos resistentes lineares. A sua designação é normalmente associada ao seu processo de fabrico, como fundição, modelagem e união.

Para o sucesso da construção de uma estrutura em membrana é essencial que todos os elementos sejam fabricados com grande rigor dimensional. Isto requer que as dimensões dos painéis em tecido, elementos constituintes da membrana, sejam obtidas a partir da configuração final da estrutura, ou seja, após o tensionamento e fluência do material. Este processo, de compensação, tem em conta a deformação elástica da tela e dos cabos, e a fluência do material. Nas superfícies com raio de curvatura

reduzido esperam-se grandes distorções, sendo necessária maior compensação do que nas superfícies de raio elevado.

3.1.1. ELEMENTOS RESISTENTES LINEARES

As superfícies de membrana são estabilizadas por bordos rígidos ou flexíveis fechados, pois as tensões que se geram são transferidas através da membrana para os elementos adjacentes, onde são encaminhadas até às fundações. Geralmente, são instalados elementos flexíveis lineares ao longo da membrana, não só como reforço desta, mas também como auxiliar na transferência das tensões mencionadas anteriormente. Estes elementos possuem somente rigidez axial, já que a sua dimensão longitudinal é muito superior à secção transversal, e são geralmente curvos, acompanhando a forma da superfície da membrana.

O arame de aço é o componente elementar de um cabo. O seu diâmetro ronda os 0,5-7mm e pode ter secções distintas. O aço utilizado nos cabos, é extremamente resistente, muito rico em carbono, quando comparado com o aço estrutural convencional. O sistema de constituição de cabos, através da junção de arames metálicos, tem inúmeras vantagens, quando comparado com a secção transversal maciça. A principal vantagem reside no facto de redução da taxa de defeito por secção. As cordas são formadas pela associação de cordões. As categorias de cordas prendem-se com a sua forma: circular, não regular e compacta. Por sua vez, um cabo é formado por uma corda, ou por uma associação paralela de cordas ou cordões, como ilustra a Fig.3.5.

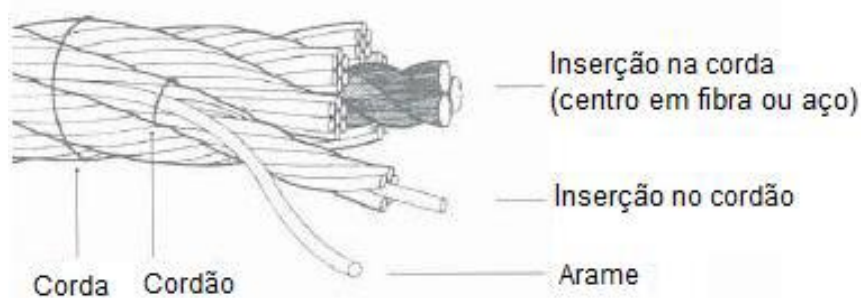


Fig.3.5 - Junção de elementos lineares [27]

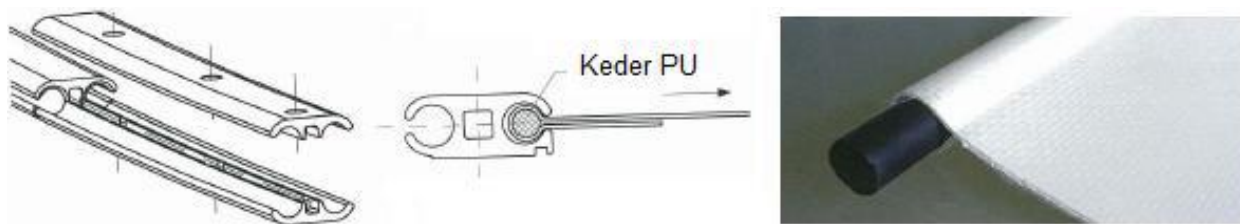
As estruturas em membrana possuem bordos flexíveis, sendo necessário o seu reforço com aplicações de fitas como ilustra a Figura 3.6. Devido ao deslizamento dos cabos pelos bordos, que criam forças de atrito tangenciais nocivas ao bordo, é necessário o reforço nessa zona. Geralmente a fita é sujeita a maiores deformações do que a membrana, sendo aplicada pré-tensão nesta, antes de ser aplicada.

Usualmente, o material constituinte das fitas é o poliéster e o poliamido. As fibras de poliéster, além de possuírem uma resistência superior ao rasgamento, também têm melhor comportamento à retração, sendo consequentemente as mais utilizadas. Quando colocadas exteriormente, devem ser protegidas contra os raios ultravioletas.



Fig.3.6 – Fixação de fitas de bordo a elemento construtivo [27]

De forma a criar bordos mais rígidos introduzem-se nas membranas elementos metálicos, onde se alojam os elementos *keder*, como ilustra a Figura 3.7. Este elemento tem como função a transmissão dos esforços da membrana para o elemento metálico representado à esquerda na Figura 3.7, bem como o correto posicionamento da membrana, evitando o seu escorregamento. O material mais usual na produção deste elemento para aplicação em membranas é o PVC em monofilamentos, polipropileno ou poliuretano, geralmente em secções circulares com diâmetro entre 5-12 mm. Contudo, dependendo do tipo de elevação, das forças a transferir e da geometria do bordo, surgem os *keders* de alumínio e de aço, em alternativa aos de plástico.

Fig.3.7 – Pormenor de elemento *keder* na membrana [27]

As forças que se desenvolvem ao longo dos elementos de cabo têm de ser transferidas para elementos de construção do tipo mastros, pilares, vigas ou fundações, através de elementos de ligação como ancoragens. As forças são transferidas através da fricção ou formas ajustáveis. O detalhe da ancoragem depende do tipo e diâmetro do cordão, do nível de força a ligar, do tipo de ligação, processo de elevação e requisitos para manutenção futura. A pormenorização e o estudo destas zonas são essenciais, visto que, são zonas de concentração de forças elevadas.

Como já foi referido, o pormenor dos bordos pode ser rígido ou flexível. No rígido, geralmente atuam forças de compressão, bem como esforços de flexão. Por outro lado, nos flexíveis apenas são permitidas forças de tração.

Num sistema de bordo flexível, os esforços da membrana originam a formação de uma linha curva no bordo. Um bordo rígido é formado por componentes lineares, fixas ou multipartidas, que recebem as forças tangenciais resultantes dos esforços de membrana. Na figura 3.8 são ilustrados os diferentes pormenores dos bordos flexíveis e rígidos.

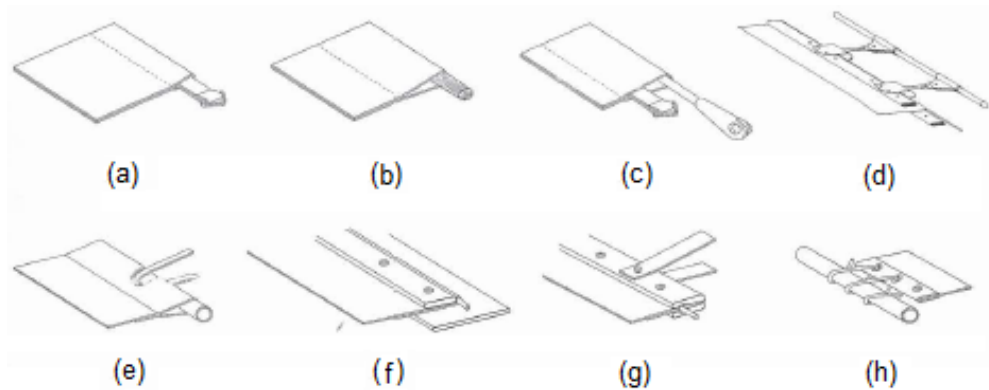


Fig.3.8 – Tipos de bordos flexíveis (a, b, c e d) e bordos rígidos (e, f, g e h): a) com fita; b) com cordão; c) com cordão e fita; d) com placa metálica suspenso por cordão; e) com tubo; f) com placa metálica; g) com placa metálica com suporte; h) tubular com entrelaçamento [27]

Outra área de interesse são as esquinas, que consistem na convergência de dois bordos de uma membrana. Os elementos resistentes são ancorados nesta zona através de um único elemento metálico. Visto ser uma zona muito solicitada, pela alternância e dimensão de carregamentos, é necessário um cuidado especial no dimensionamento, prevendo possíveis deformações. Quanto mais agudo for o ângulo de esquina, maiores serão os esforços, e maior será a influência de rigidez dos bordos para tornar a esquina mais rígida. Na figura 3.9 são representados três pormenores de esquina.

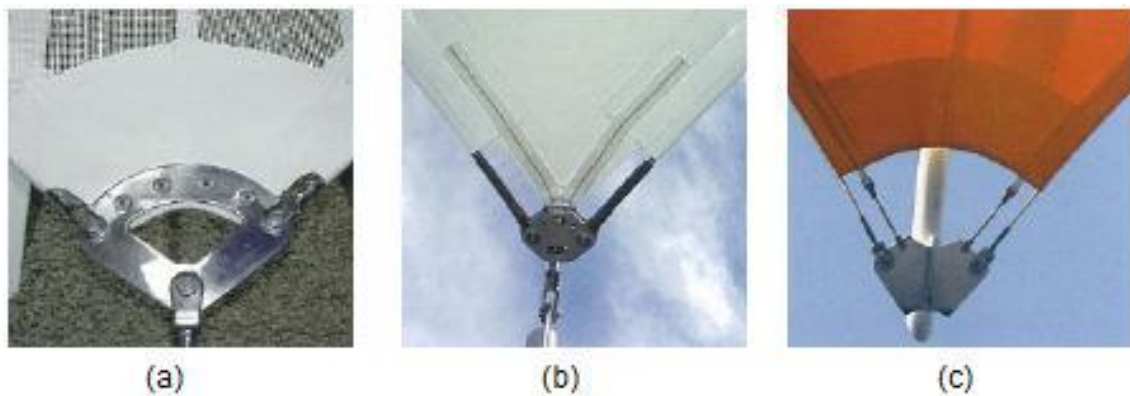


Fig. 3.9 – Pormenor esquina: a) com cordões; b) com cordões e reforço com fitas; c) com cordões e fitas [27]

3.1.2. ELEMENTOS RESISTENTES DE SUPERFÍCIE

Os materiais para membranas, atualmente, têm duas funções: estrutural e capacidade resistente ao meio ambiente, podendo dividir-se em têxteis técnicos (com ou sem revestimento) e plásticos técnicos (películas extrudidas), de acordo com a Fig.3.10.

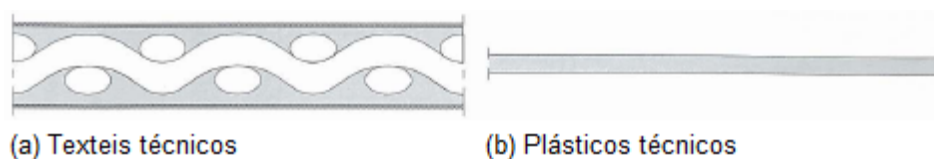


Fig.3.10 – Tipos de membranas [27]

A seleção do material a usar depende da forma da estrutura, da vida útil expectável, do comportamento estático e dinâmico e das questões relacionadas com a segurança e manutenção. Com ligações apropriadas entre os vários elementos da membrana, a transferência de carga dá-se exclusivamente através de tração.

Os tecidos têxteis revestidos são, atualmente, os mais utilizados no campo das estruturas leves. Como elemento estrutural, têm de possuir resistência, de forma a vencer os vãos entre elementos de suporte, a encaminhar forças resultantes do vento e da neve e a suportar o peso dos operadores de manutenção. De forma a obter a resistência necessária têm de ser pré-esforçados, pois não resistem a esforços de flexão e compressão. O material tem ainda de satisfazer os requisitos que afetam o ambiente interior, como escassez do ar, proteção da água, resistência ao fogo, isolamento térmico, transmissibilidade, propriedades acústicas, manutenção e durabilidade.

Os tecidos revestidos são utilizados na maioria das estruturas de membrana. Distinguem-se dois tipos neste grupo: tecidos de poliéster revestidos a PVC e fibras de vidro (ou aramido) revestidas a PTFE. Para estruturas permanentes com período de vida útil elevado deve-se usar fibra de vidro ou aramido.

O PTFE é um material inerte quimicamente, promovendo assim a autolimpeza. Caracteriza-se por ser resistente à abrasão e altamente refletivo, absorvendo pouca luz e calor. Além do seu elevado custo inicial, as fibras de vidro revestidas a PTFE têm duas desvantagens: são frágeis, logo carecem de cuidados no seu empacotamento, transporte e instalação; são pouco elásticos, logo os moldes requerem uma grande precisão. Como vantagens, enumeram-se as seguintes: o material é estável, resistente às intempéries e às altas temperaturas, resistente à tração, ao corte e à perfuração e ainda pode ser dotado de qualquer grau de translucidez.

As fibras de vidro revestidas a silicone são mais flexíveis, comparadas com as revestidas a PTFE. Consequentemente, a primeira desvantagem enumerada anteriormente não se verifica. Contudo, o silicone não possui propriedades de autolimpeza, sendo aconselhada uma limpeza anual.

O tecido de aramido, além de ter resistência superior à tração, tem maior rigidez e menos peso. Desta forma, é possível vencer vãos consideráveis sem malha de cabos. A maior desvantagem deste material é a suscetibilidade à radiação ultravioleta e, consequentemente, o impedimento do uso de revestimentos com resinas translúcidas. O revestimento deve ser escuro e composto por carbono. As costuras devem ser cozidas, e a soldadura a quente com Teflon é inadequada nesta situação.

A não-linearidade material deve-se ao processo de fabricação dos tecidos. A fiação dos tecidos que formam as membranas é efetuada em duas direções: o urdume e a trama. Durante a fiação, os fios da teia são mantidos retos, e os fios da trama são passados alternadamente pelos fios do urdume, adquirindo consequentemente uma forma mais ondulada. Após a interação entre os dois, o urdume acaba por ondular ligeiramente (Figura 3.11) e, mais tarde, quando o tecido é solicitado, esta interação intensifica-se. Daí resultam as propriedades mecânicas anisotrópicas altamente não lineares da membrana. A trama acaba por ter menor rigidez e menor módulo de elasticidade do que o urdume.



Fig.3.11 – Cortes representando amplitudes de deslocamentos da teia e da trama, depois da fiação [27]

O PVC é o revestimento para o poliéster. Apesar de ser leve e maleável, é necessária proteção contra os raios ultravioletas, caso contrário, a resistência da membrana reduz-se num prazo muito curto.

Os plásticos técnicos (*foils*) começam a ser implementados em estruturas de membrana, fazendo concorrência aos têxteis técnicos. As soluções ecológicas que advêm deste material permitem executar estruturas transparentes, sendo os *foils* fluoroplásticos os mais usados nas estruturas em questão. Estes podem ser planos ou porosos. A flexibilidade depende da espessura projetada e são resistentes aos raios ultravioleta.

Não é possível manufacturar membranas como uma peça só, sendo necessário dividi-las em elementos e posteriormente fazer a sua junção através de juntas. A resistência da membrana é tão alta quanto a resistência destas ligações. Esta característica deve-se ao tipo de material e construção da junta, bem como, à descontinuidade geométrica da membrana na transferência de forças pela sua superfície curva.

As ligações de superfície permanentes são efetuadas pelo fabricante, e as ligações temporárias ou reutilizáveis são efetuadas no local. Na figura 3.12 são ilustrados os tipos e o aspeto das ligações de superfície mais usuais. As ligações de superfície mais relevantes são as ligações permanentes, como as juntas soldadas, combinadas, costuradas e coladas e as ligações reutilizáveis como as chapas metálicas, ligação de *keder*, ligação cordoadada e entrelaçada.

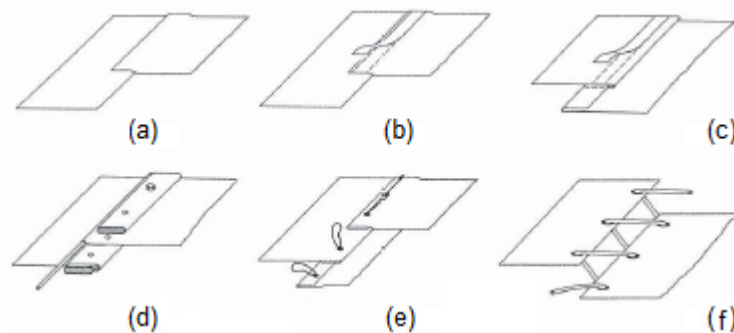


Fig.3.12 – Tipos de ligações de superfície: a) junta soldada; b) junta costurada; c) junta costurada com aba; d) ligação em chapa metálica; e) ligação cordoadada; f) ligação entrelaçada [27]

Como já foi referido, as ligações de superfície permanentes são efetuadas pelo fabricante das telas. As mais comuns, em estruturas em membrana, são as ligações soldadas. As juntas soldadas, além de aumentarem significativamente a rigidez da junta, são ainda estáveis aos raios UV e estanques à água.

A soldadura é realizada com plásticos térmicos. Sendo estes maus condutores de calor, diminuirão os problemas em telas finas ao contrário das mais espessas. As formas mais comuns de realizar a soldadura são: por alta frequência, ou com elemento quente. A soldadura com elemento quente baseia-se no aquecimento ligeiro da superfície, a qual é necessário aplicar uma determinada pressão entre o elemento e a tela. A soldadura por alta frequência forma uma larga junta homogénea em que as espessuras dos dois materiais ficam integradas.

As juntas costuradas são uma opção usual nas estruturas tradicionais do tipo tenda. No entanto, nas estruturas leves construídas hoje em dia não é a melhor opção, porque ao costurar, o tecido é danificado pela perfuração. Embora seja impermeabilizado posteriormente o tecido terá sempre perturbações.

As juntas coladas, raramente utilizadas, são apenas usadas em tecidos de fibra de vidro revestidos a silicone. Para a fabricação desta junta utiliza-se um solvente entre os tecidos, quebrando as ligações

moleculares, e a adesão é assim conseguida. A resistência alcançada com este método é semelhante à do tecido.

3.2. DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES DE CORTE

As ligações de superfície reutilizáveis podem ser aparafusadas ou entrelaçadas, dependendo da força a transmitir entre peças, pormenor e elevação. Devido à aplicação de placas metálicas introduz-se irregularidade na distribuição de rigidez da superfície de membrana, podendo interferir na deformação de toda a estrutura.

Para obter os diferentes painéis, é necessário definir os padrões de corte. Este processo inicia-se com a identificação das linhas de corte, sendo dada preferência à utilização de linhas geodésicas. Resumidamente, as linhas de curvas geodésicas representam a menor distância entre dois pontos numa dada superfície.

Um critério muito importante no arranjo dos painéis, além da impressão visual, é a maximização da resistência para o material disponível. A correta definição dos padrões de corte tem um impacto elevado na economia de uma estrutura de membrana.

A distribuição de rigidez pela membrana é determinada pelo arranjo dos painéis, que tem em conta os esforços, quer na membrana, quer nos bordos. De uma forma geral, as peças são colocadas de acordo com a direção principal, para otimizar a direção anisotrópica principal. Outra vantagem reside no facto do esforço principal não passar pelas juntas (frágeis).

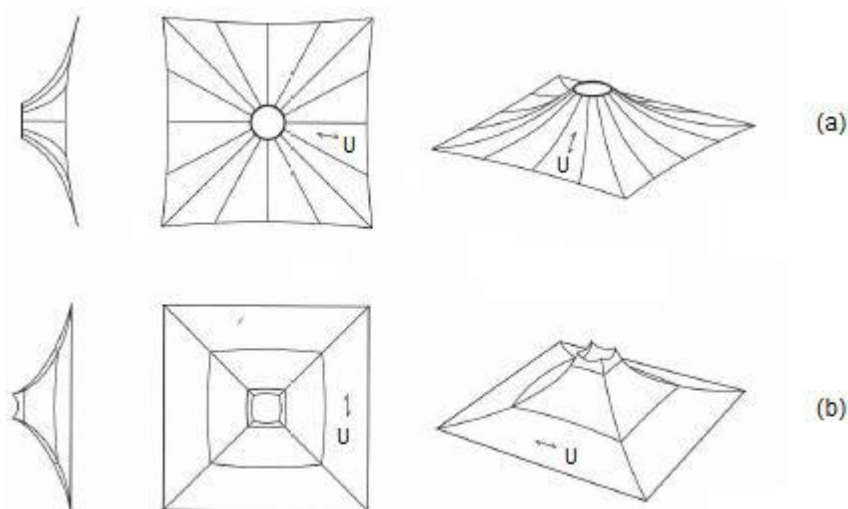


Fig.3.13 – Exemplo de arranjos possíveis dos painéis de membrana: a) radial; b) paralelo [27]

A disposição das peças pode ser radial, paralela ou mista. Normalmente, o arranjo do tipo paralelo permite uma distribuição de esforços eficaz. A disposição radial gasta mais material que a anterior e ainda é mais trabalhosa do ponto de vista da compensação.

Nas estruturas de “ponto alto”, podem-se colocar as tiras, quer paralelamente, quer radialmente ao ponto alto. No entanto, se a direção da teia estiver segundo a direção principal dos esforços (Figura 3.13.a), a deformada é menor. Contudo, nesta situação, na direção da trama é necessário maior pré-esforço para ligar as diferentes peças, de forma a homogeneizar a distribuição de esforços.

Para determinar qual a direção a ser tensionada primeiramente, deve-se efetuar uma análise da força necessária para atingir o deslocamento associado ao correto posicionamento da membrana, e o custo associado. Intrínseco a este facto está a interação entre as direções principais, que provocam forças e deformações na direção ortogonal à direção da força aplicada. Geralmente, quando são utilizados materiais anisotrópicos, concede-se à direção da trama uma compensação maior, devido à baixa rigidez desta direção à deformação.

3.3. FORMA

Coberturas em membrana criam espaços interessantes e ambientes agradáveis, através do balanço entre a luz e a sombra. Além disso, fornecem uma ampla gama de proteção contra as intempéries do sol, chuva, neve e vento. Podem ser concebidas para serem translúcidas e transparentes, o que permite o aproveitamento da luz do dia conforme o necessário.

Devido à eficácia do seu comportamento estrutural, as estruturas de membrana são capazes de redistribuir cargas elevadas aplicadas localmente. Esta característica deve-se à mudança da forma da superfície sem aumento da tensão na membrana.

A curvatura da superfície proporciona estabilidade estrutural e rigidez às membranas tensas. A escolha de grandes raios implica a atuação de forças maiores na membrana, o mesmo acontecendo com os cabos da extremidade. Quanto maior a curvatura, menores são as forças que se desenvolvem como resultado das cargas aplicadas. Devem ser evitadas grandes áreas planas, uma vez que, estas áreas podem ser suscetíveis à vibração induzida pelo vento, bem como a grandes deformações sob cargas de vento e neve.

Geralmente, existem dois tipos de formas distintas para estruturas de membrana tensa:

- Forma anticlástica, ou forma de sela, com dupla curvatura. Estas formas são tensionadas e estabilizadas devido à pré-tensão mecânica aplicada no plano da membrana ao longo dos seus limites.
- Forma sinclástica, ou forma esférica, com curvatura primária. Estas formas esféricas são tensionadas e estabilizadas por uma pressão pneumática ou hidráulica que atua perpendicularmente à superfície da membrana.

3.3.1. FORMA ANTICLÁSTICA

Pode-se estabilizar um elemento no espaço usando apenas forças de tração, desde que atuem 4 vetores não coincidentes num plano e estejam em equilíbrio. Este princípio estrutural permite a configuração estável de estruturas em membrana tensa.

Numa superfície anticlástica duplamente curvada, a soma das curvaturas positivas e negativas é igual a zero. Estas resistem às cargas externas devido à sua forma e não à sua massa, o que permite a escolha de formas arquitetónicas que cobrem grandes áreas com uma quantidade mínima de material.

A superfície tensa em si, é o principal elemento estrutural de uma estrutura de membrana. A superfície é mantida em equilíbrio pelos reforços da borda (tais como fitas ou cordões) que estão dispostas no espaço a partir do apoio.

Dois métodos de base são usados para definir uma forma de cobertura em membrana. O primeiro baseia-se na fixação dos suportes internos e externos e as condições de fronteira de modo a formar um equilíbrio de tensão contínuo para a estrutura. Isso permite a criação de ambientes agradáveis do ponto

de vista estético e arquitetônico. O segundo método consiste na junção de painéis modulares duplamente curvados, anteriormente definidos, que formam deste modo estruturas maiores.

A estrutura anticlástica mais básica é em forma de parabolóide hiperbólico (Fig.3.14.a), com quatro pontos de fixação, definidos por uma alternância entre pontos altos e baixos e ligados por arestas retas ou curvas. Para estruturas mais complexas e amplas (Fig.3.14.b) unem-se vários módulos. A figura 3.14 ilustra dois dos muitos arranjos modulares de estruturas com formas complexas, de natureza repetitiva ou segmentada.

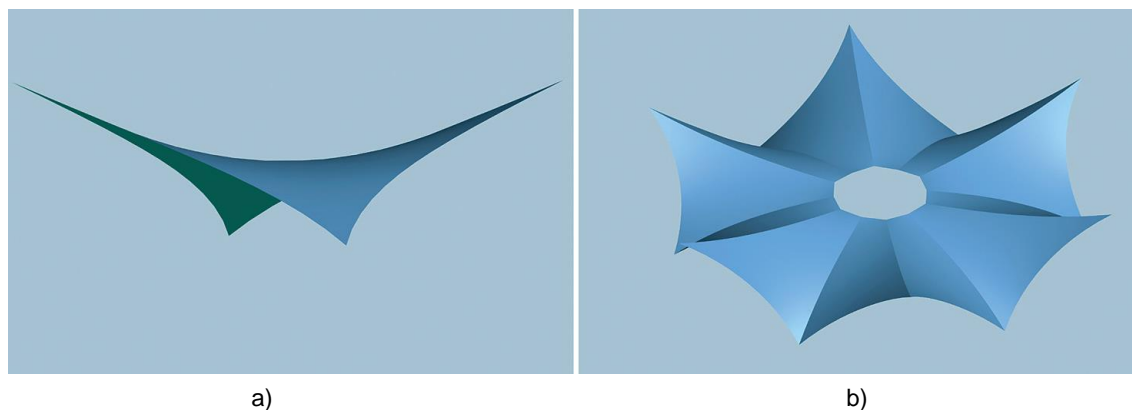


Fig.3.14 – Modelos anticlásticos: a) Parabolóide hiperbólico; b) Conjunto de módulos [24]

Como alternativa, as estruturas em membrana podem adquirir formas livres, as quais são arquitetonicamente atraentes devido ao seu aspecto dinâmico e contínuo. Contudo, apresentam um comportamento estrutural mais complexo e exigem um projeto mais detalhado, uma vez que os elementos não se repetem.

Conforme os vãos a vencer, diferentes formas são escolhidas. A solução de parabolóide hiperbólico simples, com quatro pontos de apoio, é a mais eficiente e leve para vãos entre 15-20 metros. Para vãos maiores, esta forma exigiria grande altura, acumularia cargas pontuais elevadas nos apoios e perderia a sua função arquitetônica. Assim sendo, são necessários limites lineares internos, tais como cumes, vales ou arcos, que são suportados por vigas internas, mastros estruturais, ou que, estão suspensos a partir de suportes externos.

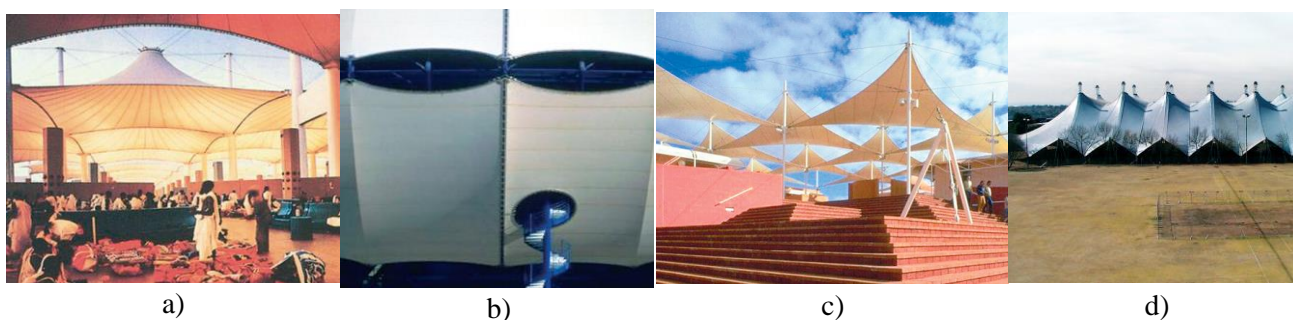


Fig.3.15 – Estruturas anticlásticas: a) Cone; b) Sela; c) Parabolóide Hiperbólico; d) Cume e vale

Existem quatro tipos genéricos de superfície anticlástica de uso comum - o cone, a sela, o parabolóide hiperbólico e o cume e vale. Estas formas são ilustradas, correspondentemente, na figura 3.15.a-d. É

possível observar a fluência da forma, a partir de 4 elementos laterais deformáveis, dependente das condições de fronteira.

3.3.2. FORMA SINCLÁSTICA

As membranas com forma sinclástica possuem curvatura primária ao longo de toda a superfície, sendo, normalmente, equilibradas por um estado interno de tração devido à atuação de pré-esforço, bem como pela diferença de pressão de um gás ou fluido, que atua perpendicularmente à superfície. As forças que se desenvolvem são proporcionais à curvatura da superfície, fazendo corresponder esforços maiores a raios mais elevados.

O Projeto Éden (Fig.3.16) é uma atração turística na Cornualha, Reino Unido, e inclui a maior estufa do mundo. Para a construção das cúpulas geodésicas, os projetistas moldaram lâminas triplas de ETFE em almofadas, com a forma sinclástica. O colchão de ar fornece isolamento sem diminuir a quantidade de luz solar que passa através da membrana.

Neste grupo de formas, encontram-se as estruturas suportadas por ar e as moldadas por pressão hidrostática. Na presente dissertação não será dado foco às formas hidrostáticas, uma vez que não correspondem aos objetivos de trabalho.



Fig.3.16 – Projeto Éden – Reino Unido⁶

As estruturas suportadas por ar são membranas tensas, com forma sinclástica, estabilizadas pela diferença de pressão em toda a superfície. A diferença de pressão é gerada pela indução de ar, por parte de ventiladores, para o interior de uma cobertura em membrana impermeável. Não são necessários elementos rígidos de apoio, como colunas, paredes, arcos, etc. Esta característica faz destas estruturas, com superfícies mínimas, as mais leves construções feitas pelo homem. Em teoria, permitem a construção de vãos com vários quilômetros apenas suportados por ar.

Os níveis de tensão na superfície, de uma estrutura em membrana suportada por ar, estão relacionados com a curvatura da superfície. Numa esfera de raio " r ", insuflada com uma pressão " p ", a tensão na membrana é dada por $M = 1/2pr$. Esta relação é válida para qualquer dimensão da estrutura.

Coberturas esféricas achatadas são muito eficientes quando expostas ao vento, principalmente porque evitam a exposição de grandes áreas a pressões descendentes. No entanto, apresentam grandes deslocamentos, principalmente em carregamento antissimétrico não-uniforme de vento ou neve.

⁶ Fonte: <http://bagarai.com.br/construcoes-diferentes.html>

São possíveis outras tipologias de construções utilizando membranas suportadas por ar. As variantes possíveis focam-se nos três seguintes tipos base: estruturas insufladas, estruturas aspiradas e estruturas infladas. As estruturas insufladas (Fig.3.17.a) consistem na utilização de uma membrana suportada por uma pressão interna ligeiramente maior que a pressão atmosférica para conformar um espaço utilizável. Já as estruturas aspiradas (Fig.3.17.b) funcionam de forma semelhante às estruturas insufladas, contudo, ao invés de se criar uma pressão interna maior que a atmosférica, cria-se uma pressão interna menor. Por último, as estruturas infladas (Fig.3.17.c) consistem na utilização de balões pressurizados como elementos estruturais, tais como vigas, colunas, entre outros.

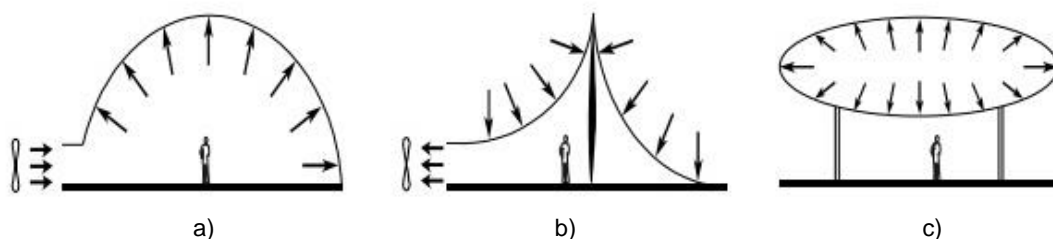


Fig.3.17 – Estruturas Pneumáticas: a) Insuflada; b) Aspirada; c) Infladas

3.4. REGRAS DE DIMENSIONAMENTO

A maioria dos regulamentos nacionais e Eurocódigos baseiam-se na abordagem de "estado limite", ou seja, para várias combinações de ações majoradas, a estrutura e os seus componentes devem cumprir critérios de resistência aceitáveis e ainda garantir limites de deformação e degradação para combinações de ações de serviço. Outra abordagem, o princípio das "tensões admissíveis", admite uma determinada percentagem da tensão de cedência do material constituinte como sendo a tensão máxima que se desenvolve na estrutura, quando esta é carregada com as ações de serviço.

Nas estruturas em membrana, a segunda abordagem é a mais utilizada. Estas estruturas exibem um comportamento não linear geométrico, de tal forma que a geometria da estrutura é fortemente afetada, tanto pela intensidade, como pela distribuição das ações. Devido à variação das propriedades dos materiais e aos elevados fatores de segurança que são aplicados à tensão de rotura do tecido, o princípio das tensões admissíveis é o mais adequado. Os coeficientes de segurança têm em conta vários aspetos, tal como a resistência ao rasgamento, a degradação com o tempo, entre outros.

De forma a avaliar a resistência de estruturas submetidas à tração, em particular, os componentes têxteis, os cabos, as fitas e as cordas, as cargas de dimensionamento são tomadas como valores característicos (ou cargas máximas de serviço). Assim sendo, os vários componentes são verificados com base na tensão admissível, que além de permitir a inclusão da incerteza quanto à variabilidade do material, permite igualmente, adotar coeficientes parciais de segurança associados ao tipo de carregamento.

Tipicamente, os fatores de segurança rondam aproximadamente, entre 5 a 7 para a resistência do tecido, 2,5 para os cabos e 3 para as fitas. Estes coeficientes aplicam-se à tensão de ruptura, e dependem dos materiais utilizados e do tipo e duração do carregamento. Para elementos em aço, os coeficientes aplicam-se às forças e momentos obtidos depois da análise não-linear geométrica, considerando a articulação/alteração para diferentes casos de carga. Os valores citados acima são ilustrativos, os coeficientes devem ser adaptados às condições ambientais, à qualidade de fabricação, bem como as condições especiais do projeto.

No caso de estruturas em membrana que possuam elementos de suporte sujeitos a encurvadura (como arcos esbeltos), para além da análise não linear geométrica (com os respetivos fatores de segurança), deve-se proceder à verificação de estabilidade da estrutura aplicando um coeficiente de segurança de 2 para ações de média ou longa duração e 1.8 para rajadas de vento.

3.4.1. COEFICIENTES DE SEGURANÇA PARA MEMBRANAS

A resistência dos materiais constituintes de estruturas em membrana depende de vários fatores, tais como a idade, degradação por manuseamento, existência de vincos, fadiga, fluência, ação da temperatura e outros fatores ambientais, bem como a não uniformidade criada durante o processo de fabrico.

Atualmente, existem vários estudos e recomendações, provenientes de vários países, para a caracterização da resistência da membrana. Alguns são baseados no método das tensões admissíveis, enquanto outros no método dos estados limites. Independentemente da abordagem adotada, existe razoável consistência entre os coeficientes de segurança recomendados.

O grupo de trabalho 7 da IASS concebeu recomendações, orientadas principalmente para estruturas insufladas, baseadas na metodologia das tensões admissíveis.

A definição do coeficiente global de segurança envolve um fator de aplicação, um fator de importância e fatores quanto às incertezas relacionadas com a estimativa das ações aplicadas, o rigor e verificação do cálculo estrutural e a qualidade de execução da obra. Da conjugação dos vários fatores resulta um coeficiente de segurança global, que deve ser aplicado à resistência do material, situado no intervalo entre 4.2 a 6.0 para a direção principal das fibras e entre 5.0 a 7.0 para a direção secundária.

Pelo Manual Francês de Coberturas Têxteis de Carácter Permanente, a tensão admissível (direção principal ou secundária) no material constituinte da membrana é o resultado da interação de vários fatores, com a tensão mínima de rotura específica do material. Os fatores considerados têm em conta a qualidade da membrana, a dimensão da estrutura e a segurança desta quanto ao nível de poluição/degradação a que está sujeita.

A prática Alemã combina a Norma DIN 4134 e a dissertação “Comportamento Mecânico de Ligações em Telas Revestidas”, de Minte (1981), que refere uma série de coeficientes de segurança baseados em ensaios experimentais.

Anteriormente, a abordagem da norma DIN 4134, para Estados Limites Últimos, baseava-se na consideração de ações majoradas e respetivos coeficientes de segurança. Conforme referido em 2.4.3, a abordagem anteriormente descrita deixou de ser apropriada e a prática de projeto passou a ser baseada na filosofia de tensões admissíveis, aplicando ações de cálculo não majoradas (exceto em verificações de equilíbrio estático). Esta nova abordagem inclui, no entanto, um fator que depende do tipo de carregamento, mas que atua reduzindo o valor da tensão admissível. Assim, resultam os coeficientes globais de segurança indicados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Coeficientes globais de segurança

Ações	Material	Ligações
Permanentes	4.9 – 6.4	6.7 – 9.5
Vento	2.9 – 3.2	3.5
Neve	4.4 – 5.1	4.9

O Manual da Associação de Estruturas em Membrana do Japão recomenda que se adote como coeficiente de segurança de 8 no caso de ações de longa duração e 4 em ações de curta duração. Para membranas utilizadas exclusivamente como revestimento em estruturas porticadas, os coeficientes de segurança são reduzidos para 6 e 3, respetivamente.

Geralmente, para estruturas permanentes ou semipermanentes, expostas a ações de longa duração, utiliza-se frequentemente um coeficiente de segurança mínimo de 5, em relação ao material. Contudo, em certos casos que envolvam ações de curta duração, o coeficiente poderá estar entre 3 e 4, sendo que, em ligações e zonas de concentração de tensões, este valor pode aumentar até 7.

Dois aspetos que não são explicitamente considerados nos códigos/manuais Europeus são a propagação de rasgos na membrana e a rotura de emendas por fluência sob a ação de temperaturas elevadas.

Normalmente, a resistência do material ao rasgamento é elevada, evitando assim, que pequenos defeitos e rasgos pré-existent se propaguem pelo efeito das ações de cálculo. As forças de rasgamento desenvolvem-se consoante o tipo e tamanho de defeito. Como tal, é necessário antever, através de ensaios, a resistência ao rasgamento de um material que possa ser posteriormente aplicado em projeto.

Os ensaios de rasgamento em painel largo, usando amostras de 40cm de largura e 100cm de comprimento (dimensões mínimas), com um rasgo central transversal de 4 cm de desenvolvimento, permitem relacionar a resistência de uma tela sem defeitos com a menor resistência que esta apresentará na presença de um pequeno rasgo, intersectando o caminho de forças. Foram realizados ensaios em vários tipos de tecido (polyester revestido a PVC e fibras de vidro revestida a PTFE), concluindo que a resistência de um tecido danificado é reduzida de um fator entre 3 e 4. Por segurança, opta-se por um coeficiente de 4, devido ao reduzido número de ensaios realizados.

3.4.2. COEFICIENTES DE SEGURANÇA PARA CABOS

Para o dimensionamento de elementos em aço, tais como os cabos utilizados nestas estruturas, é utilizado o Eurocódigo 3, Parte 1.11. Este fornece regras de dimensionamento para elementos de aço, constituintes de estruturas submetidas a esforços de tração, bem como para ligações ajustáveis e/ou substituíveis.

A filosofia seguida consiste, primeiramente, na divisão dos elementos disponíveis em grupos, tendo em conta as cordas, arames e cordões, e posteriormente analisa o tipo de estruturas em que são aplicados, distinguindo-se três grupos: A, B e C (EC3 Parte 1.11 – tabela 1.1). O elemento é ainda classificado quanto à sua exposição a condições nefastas de fadiga e corrosão (EC3 Parte 1.11 – tabela 2.1).

No dimensionamento são considerados o Estado Limite Último (rotura dos componentes quando excedida a resistência à tração, tendo em conta a durabilidade), o Estado Limite de Serviço (limitando os níveis de tensão e deformação), bem como a Fadiga (limitação da variação de esforços provocados quer pela variação de carga axial quer pelas oscilações provocadas pelo vento ou vento e chuva).

Para o Estado Limite Último deve ser verificada a relação:

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1 \quad (3.1)$$

Em que:

- F_{Ed} é o valor do esforço axial de cálculo;
- F_{Rd} é o valor do esforço da tensão resistente:

$$F_{Rd} = \min \left\{ \frac{F_{uk}}{1,5\gamma_r}; \frac{F_k}{\gamma_r} \right\} \quad (3.2)$$

Em que:

- F_{uk} é o valor característico da força de rotura, que difere consoante o grupo a que determinado elemento faz parte (A, B ou C);
- F_k é o valor característico de 0,2% da força resistente, $F_{0,2k}$, ou de 0,1% da mesma força, $F_{0,1k}$, comprovado através de ensaios para cabos ou por cálculo para barras (EC3 Parte 1.11 – tabela 6.1);
- γ_r é o fator parcial (0,9 ou 1,0, respetivamente se existem ou não medidas para suprimir os momentos na ancoragem).

Por último, recomenda-se especial atenção nas zonas de selas e grampos. Normalmente, limitam-se as tensões e pressões transversais bem como certos parâmetros geométricos. Para mais detalhes consultar o EC3, Parte 1.11.

Para o Estado Limite de Serviço são considerados dois aspetos:

- Deformações ou vibrações que influenciem o dimensionamento da estrutura;
- O comportamento dos elementos de elevada resistência, tanto o comportamento elástico como a sua durabilidade.

Com o objetivo de limitar as deformações e vibrações, surge a necessidade do aumento da rigidez, concebida através do sistema estrutural, das dimensões e pré-tensão dos componentes de alta resistência, bem como pela resistência ao escorregamento de alguns elementos.

O limite de tensão relaciona-se com a tensão de rotura da seguinte forma:

$$\sigma_{uk} = \frac{F_{uk}}{A_m} \quad (3.3)$$

São impostos limites para a tensão em fase de construção e de serviço. O regulamento estipula que para a fase de construção, a percentagem de tensão admissível varia de acordo com as condições de construção, tal como ilustra a tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Limite de tensões na fase de construção

Condições de esticamento dos cabos	f_{const}
Curta duração	$0,60 \sigma_{uk}$
Longa duração	$0,55 \sigma_{uk}$

Já na fase de serviço, o limite da tensão admissível é influenciado pelos esforços ao qual o cabo está sujeito. Na tabela 3.3 são expostas as percentagens quanto à tensão admissível permitida no dimensionamento à fadiga.

Tabela 3.3 – Limite de tensões para condições de serviço

Incerteza do modelo à fadiga	f_{ELS}
Dimensionamento à fadiga incluindo esforços de flexão*	$0,50 \sigma_{uk}$
Dimensionamento à fadiga sem esforços de flexão	$0,45 \sigma_{uk}$

* Esforços de flexão devem ser reduzidos, tomando medidas de pormenorização

A vibração dos cabos pode ocorrer quando estes são expostos às condições climáticas, tais como as ações do vento, e quando são transmitidas vibrações por parte de outros elementos da estrutura. Este é um fenómeno incidente neste tipo de estruturas e requer alguns cuidados quer pelo projetista, tal como pelo construtor.

No regulamento em questão, são definidas algumas regras tendo em conta a estimativa do risco de incidência de vibração nos cabos, entre as quais se salientam:

- O risco de vibração é proporcional ao aumento do comprimento do cabo (geralmente, cabos estaiados até 70-80 metros não envolvem risco);
- O risco de ressonância deve ser estudado em fase de dimensionamento;
- Para garantir a segurança dos utilizadores, a amplitude de vibração dos cabos não deverá exceder $L/500$ (L é o comprimento da corda), para uma velocidade do vento de 15m/s.

3.5. AÇÕES EM ESTRUTURAS DE MEMBRANA

Segundo o funcionamento das estruturas leves, a relação entre as ações atuantes e o seu peso próprio é normalmente muito superior ao característico das estruturas convencionais. Assim sendo, alterações na intensidade das ações do vento ou neve terão um impacto maior, tanto no dimensionamento dos elementos estruturais, bem como, na escala das deformações resultantes.

Consequentemente, a definição das ações a considerar na análise e dimensionamento de membranas tensas tem de ser cuidada e ponderada quanto ao tipo de estrutura em causa. Uma das dificuldades encontradas neste processo advém da legislação atual, por vezes torna-se demasiado específica quanto ao sistema estrutural e é constituída por uma ampla gama de regulamentos, tornando difícil a aplicação de um único código.

3.5.1. PRÉ-ESFORÇO

O nível de pré-esforço necessário surge como resultado do processo de busca da forma. A sua implementação ocorre durante a construção, sendo posteriormente mantido esse nível de pré-esforço ao longo da vida da estrutura. Estas forças têm de ser incluídas em todos os casos de carga considerados.

Os efeitos diferidos, tais como a fluência do material constituinte da membrana, podem alterar os níveis de pré-esforço instalados. A ocorrência de assentamentos de apoio, embora raramente, também pode ter influência na definição do pré-esforço. De forma a assegurar o nível de pré-esforço necessário, estes efeitos devem ser considerados para serem tomadas as devidas precauções.

Geralmente, o nível mínimo de pré-esforço requerido pelas membranas depende da rigidez e resistência do material, bem como da eficiência da superfície. Quando os níveis de pré-esforço são

inferiores aos necessários, a aparência torna-se pouco uniforme ou enrugada, uma vez que nem todas as fibras da tela se encontram suficientemente tracionadas.

Em membranas constituídas por fibras de poliéster revestidas a PVC aconselha-se que o pré-esforço instalado não seja inferior a 1.3% da resistência média à tração do material, nas duas direções principais. Esta recomendação conduz a valores entre 0.70 a 2.00 kN/m, para diferentes tipos de fibras de poliéster revestidas a PVC.

Podem ser aplicados níveis de pré-esforço superiores aos citados, com a finalidade de minimizar as deformações em membranas com curvatura pouco eficiente. Contudo, quanto mais pré-esforço atuar, menor será a gama de tensões disponível para a estrutura responder as restantes ações de serviço. No caso de estruturas temporárias, ou em casos especiais, poderão ser aplicados valores inferiores aos citados.

Os níveis característicos de pré-esforço em membranas constituídas por fibras de vidro revestidas a PTFE tendem a ser superiores aos atrás indicados, sendo que, este material tem maior rigidez. A força instalada não deverá ser inferior a 2.00kN/m e a classe mais resistente destas fibras é frequentemente pré-esforçada a 5.00kN/m. Em superfícies muito planas, as forças de pré-esforço poderão atingir 10.00kN/m.

A prática usual, em pré-dimensionamento, sugere que o pré-esforço instalado não seja inferior a 2.5%, nem superior a 6.0% da resistência média à tração do material, nas duas direções principais. Os valores indicados poderão ser tomados como referência quanto à satisfação dos requisitos mínimos relativos ao pré-esforço de estruturas permanentes em membrana tensa.

O rácio, de pré-esforço, entre as duas direções principais da membrana é selecionado durante o processo de busca da forma, sendo os níveis validados posteriormente durante a análise estrutural. Em geral os rácios de pré-esforço utilizados não deverão exceder 1:4 ou 4:1.

3.5.2. PESO PRÓPRIO

O peso próprio de uma membrana varia normalmente entre 0.7 e 2.0 kg/m². Não é usual considerar o peso próprio no processo de geração de forma, uma vez que, poderá introduzir entropia na resposta da membrana a sucções por ação do vento. Contudo, o peso próprio da membrana terá de ser considerado em todos os casos de carga.

3.5.3. AÇÃO DO VENTO

A ação do vento integra o conjunto de ações mais relevantes no projeto de estruturas em membrana tensa, devido ao baixo peso próprio que estas apresentam. Esta ação constitui um problema complexo nestas estruturas, tanto pela dificuldade da sua caracterização teórica bem como pelos efeitos resultantes.

O vento é normalmente considerado como uma ação estática, definida pelo produto de uma pressão dinâmica por um coeficiente de pressão (C_p). Para estruturas importantes, com formas complexas, o ensaio em túnel de vento é o mais aconselhado na determinação dos coeficientes de pressão. O Eurocódigo 1, parte 1.4 [28], permite determinar a velocidade do vento e respetiva pressão dinâmica.

O vento atua, geralmente, nas duas faces da membrana simultaneamente, havendo assim, valores distintos para os coeficientes de pressão interiores e exteriores, que podem ser obtidos através da atual legislação e artigos científicos. A ação resultante da junção dos dois efeitos deve ser incluída no

modelo analítico da estrutura, sendo as pressões aplicadas normalmente à superfície. Nas estruturas fechadas, que funcionam apenas com uma face exposta, como é o caso das coberturas de edifícios, é necessário ter em conta a pressão interior. Se existirem aberturas de grande dimensão quer em paredes, quer na própria cobertura, a pressão interior pode ser significativa.

Nas estruturas insufladas, a pressão interior é controlada, sendo a pressão dinâmica do vento aplicada unicamente na face exterior da membrana.

Para estruturas de pequena dimensão, atendendo à legislação em vigor, dificilmente se encontram modelos semelhantes, sendo desta forma necessário ponderar considerações conservativas na definição dos valores de C_p . Os documentos auxiliares nesta tarefa são por exemplo:

- EC1 – Parte 1.4;
- BS 6399 – Parte 2;
- DIN 1055 – Parte 4;
- Cook, N.J. – “The Designers Guide to Wind Loading of Building Structures – Part 2”, BRE/Butterworths.

3.5.4. AÇÃO DA NEVE

A ação da neve, em semelhança à ação do vento, representa nas estruturas de cabos e de membranas, uma ação importante a considerar no seu dimensionamento. Esta ação deve ser definida de acordo com o disposto no Eurocódigo 1, parte 1.3 [29].

Em regiões não sujeitas a queda de neve deve ser considerada uma carga uniformemente distribuída de valor não inferior a 0.30 kN/m^2 . Este valor poderá ser reduzido em estruturas com vãos superiores a 50m desde que seja realizada uma análise estatística dos valores correspondentes às restantes ações.

Pode haver deposição de neve em coberturas sob condições de vento fraco ou forte. Sob vento fraco a neve tenderá a depositar-se de forma uniforme sobre toda a cobertura. O EC1 fornece indicações sobre os coeficientes a serem aplicados nesta situação.

Sob condições de vento forte a neve tenderá a acumular-se em determinadas zonas, originando assim um carregamento não uniforme da superfície da cobertura. A distribuição desta ação depende da configuração da cobertura e da direção de atuação do vento.

No caso de coberturas constituídas por séries de cumes e vales, sujeitas a vento forte, a neve afastar-se-á dos cumes e tenderá a depositar-se nos vales. O EC1 fornece coeficientes relativos à quantidade máxima de neve a considerar nos vales e à quantidade mínima a considerar nos cumes. No entanto, este efeito é de difícil previsão devendo ser tomadas medidas cautelosas.

Estruturas de grande envergadura sujeitas à ação da neve juntamente com vento podem ser modeladas em túnel de vento, de forma a prever a distribuição da neve na cobertura. É geralmente assumido que a quantidade total de neve que se deposita na cobertura se mantém inalterada, mas sob condições de vento forte poderão ocorrer concentrações de carga em determinadas zonas.

3.5.5. AÇÃO DA TEMPERATURA

No que diz respeito ao comportamento global das estruturas em membrana, verifica-se que o efeito da variação da temperatura é inferior do que no caso de construções rígidas. Tais efeitos manifestam-se

por variações relativamente pequenas dos níveis de pré-esforço instalados. No entanto, estes efeitos podem ser relevantes quando a estrutura integra redes de cabos de aço.

3.5.6. AÇÃO SÍSMICA

No geral, a ação sísmica não causa problemas, uma vez que as estruturas em membrana são muito leves. Isto impede a incidência de acelerações significativas na ocorrência de um sismo. No entanto, caso a estrutura contenha elementos de massa significativa, tais como treliças ou ligações, essas acelerações deverão ser consideradas para esses elementos.

3.6. PROGRAMAS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO DE APOIO AO DIMENSIONAMENTO

Para a busca da forma podem ser utilizados diferentes métodos como o da superfície mínima, o das tensões uniformes, o dos deslocamentos incrementais e o da densidade de forças [25].

As ferramentas de cálculo disponíveis no mercado no processo de modelação e análise das estruturas tensionadas são, por exemplo, o FORTEN 2000, Arcgyris ou o ANSYS.

Na determinação da forma será usado o programa ForTen2000 [30], o qual se baseia no método da Densidade de Forças. Este método utiliza uma técnica analítica para linearizar as equações de geração de formas aplicáveis a uma rede tensionada de cabos. Esta linearização torna o método independente das propriedades do material constituinte da membrana. Os rácios de densidade de força (força no cabo dividida pelo comprimento do cabo) precisam de ser especificados para cada elemento, sendo que rácios diferentes dão origem a formas de equilíbrio diferentes. Este método é numericamente robusto e independente da localização inicial dos nós da malha, sendo a forma de equilíbrio determinada com facilidade.

Na análise não linear são consideradas sucessivas posições de equilíbrio da estrutura (resultantes das suas deformações) à medida que esta é sujeita a níveis de carga crescentes. Neste caso a matriz de rigidez elástica da estrutura é reajustada tendo em conta a configuração da sua deformada resultante dos carregamentos. A instabilidade ocorre quando não é possível atingir o equilíbrio para um dado incremento no carregamento. A base da maioria dos métodos computacionais utilizados na análise de estruturas em membrana tensa é a modelação da configuração de equilíbrio.

O programa utilizado na análise não-linear geométrica da estrutura foi o SAP2000 [31]. Este resolve o cálculo da estrutura com o auxílio do método de Newton-Raphson, considerando uma carga P aplicada numa superfície de geometria inicial G_0 e pré-esforço inicial S_0 . É fixado um número de incrementos n e de iterações t , assim como a precisão de cálculo. O primeiro incremento de carga aplicado tem o valor $P_1=P/n$, dando origem a uma nova geometria G_1 e a um novo estado de tensão S_1 . Se o incremento de carga for pequeno quando comparado com o estado inicial de tensão S_0 , então as variações de tensão $\Delta S=S_1-S_0$ e de geometria $\Delta G=G_1-G_0$ serão também pequenas, podendo o problema ser linearizado e resolvido em t ciclos de iteração. É assim obtida uma nova geometria G_1 que está em equilíbrio com a tensão S_1 e a carga P_1 , sendo em seguida calculada a resposta devido a um novo incremento de carga $P_2=P_1+P/n$ e determinados a nova geometria e estado de tensão, G_2 e S_2 . Após n iterações, a ação P foi completamente aplicada e a geometria e estado de tensão finais, G_n e S_n , foram determinados.

4

SISTEMA RÍGIDO - SMARTPARK

4.1. SISTEMA ESTRUTURAL

O grupo Martifer projetou um parque de estacionamento, denominado *SmartPark* que, além das funções habituais, permite o aproveitamento da energia solar incidente. O sistema estrutural consiste numa estrutura de suporte formada por perfis em aço enformados a frio, provenientes da empresa Constálica e designados por *MadreMax*, e uma cobertura fotovoltaica resultante da tecnologia de silício cristalino, da empresa MPrime.

Como objeto de estudo será analisada a solução *Dual 5m* (Fig.4.1), com um exemplar localizado na sede da Martifer, em Oliveira de Azeméis. Para a análise estrutural da presente solução foi utilizado o programa de cálculo ROBOT.

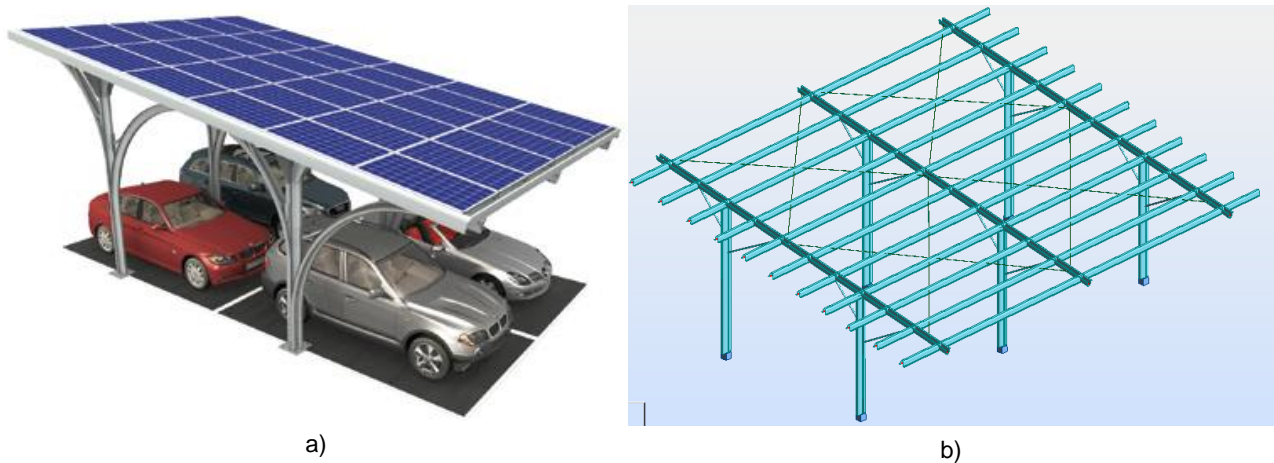


Fig.4.1 – SmartPark: a) Representação esquemática; b) Modelo de cálculo ROBOT

A estrutura de suporte dos painéis fotovoltaicos pode ser dividida numa estrutura principal, formada por uma série de pórticos, e numa estrutura secundária, constituída por uma sucessão de madres transversais aos pórticos.

A estrutura principal (Fig.4.2) é constituída por pilares com secção $\Omega 150 \times 1.5$ tubular, vigas com secção $\Omega 150 \times 1.5$ e diagonais em perfis laminados a quente de secção CHS48.3 \times 2.9. As vigas são reforçadas nas zonas de maiores esforços, por sobreposição de perfis.

O sistema de contraventamento é composto por varões de 10 mm de diâmetro, dispostos como indicado na Fig.4.1.b.

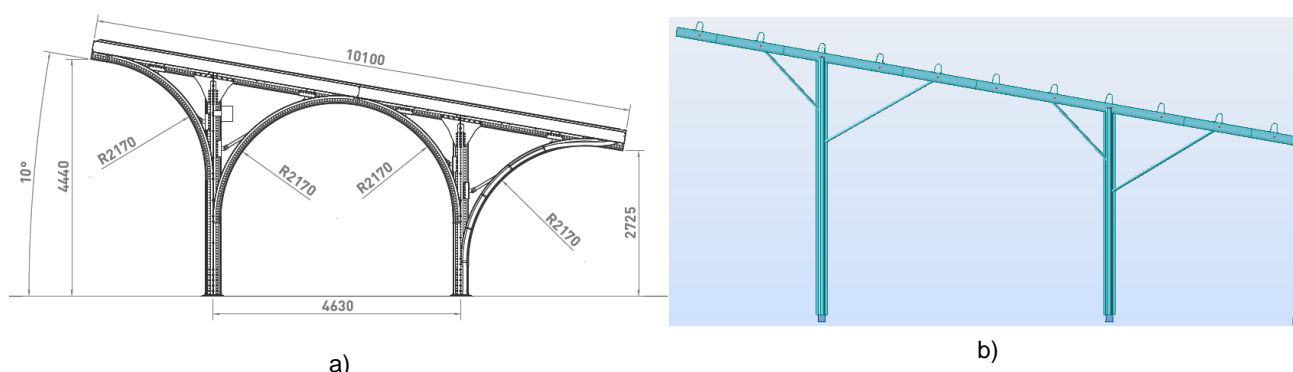


Fig.4.2 – Estrutura principal: a) Dimensões; b) Modelo de cálculo ROBOT

A estrutura secundária é constituída por perfis de secção $\Omega 150 \times 1.5$, dispostos como indicado na Fig.4.3. O espaçamento entre madres não é constante, de forma a facilitar a fase de construção. As madres apoiam nas vigas constituintes dos pórticos e vencem um vão de 5m.

Nas zonas de apoio as madres são reforçadas por sobreposição de perfis, num comprimento total de 300 mm de cada lado do apoio.

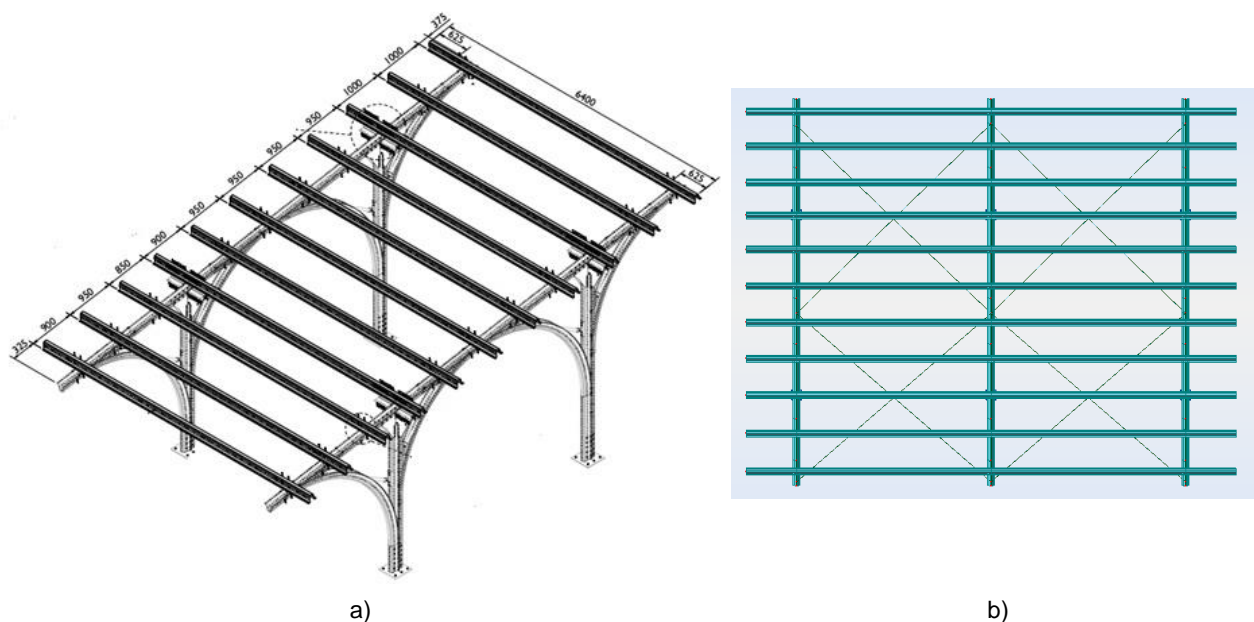


Fig.4.3 – Estrutura secundária: a) Dimensões; b) Modelo de cálculo ROBOT

Como já foi referido, o material utilizado na estrutura de suporte é o aço, apenas varia a sua classe consoante o elemento em questão. Os perfis enformados a frio de secção Ω são formados por aço S320GD+Z (EN 10326), enquanto os restantes elementos, diagonais e sistema de contraventamento, são concebidos em aço de classe S275 (EN 10025: Parte 2). Na tabela 4.1 são apresentadas, resumidamente, as propriedades dos diferentes aços utilizados.

Os elementos com secção *MadreMax* apresentam furos longitudinalmente na alma e banzos inferiores, ao longo de todo o elemento, espaçados de 50 mm entre si. Estes furos permitem a fixação entre elementos, utilizando parafusos M10 com classe de resistência aconselhada de 8.8.

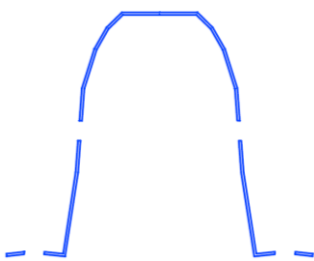
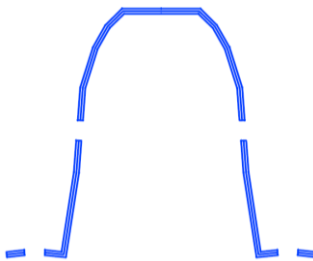
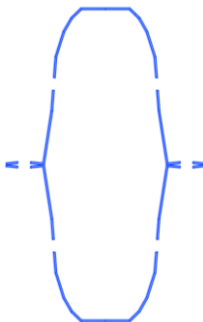
Tabela 4.1 – Propriedades do aço estrutural

Aço	S320	S275
f_y (MPa)	320	275
f_u (MPa)	390	430
E (GPa)	210	210
ν	0,3	0,3
G (MPa)	80769	80769

As diferentes secções *MadreMax*, com forma Ω , são de classe 4, tanto em flexão como em compressão pura. Consequentemente, é necessário determinar a secção efetiva, ou seja, a fração da secção que resistirá verdadeiramente aos esforços atuantes.

A tabela fornecida pela Constálica (anexo 1) apenas fornece as propriedades da secção efetiva simples. Contudo, devido a indicações do fabricante, fundamentadas em ensaios laboratoriais, adotou-se, por simplificação, a secção efetiva dupla como sendo dada pela sobreposição de duas secções efetivas simples. Quanto à determinação da secção efetiva tubular, é razoável considerar a secção furada como a secção efetiva. Para a determinação das diferentes propriedades, tanto da secção dupla como da secção tubular, foi utilizado o programa AUTOCAD, onde foi possível desenhar e extrair os dados necessários das diferentes secções. Na tabela 4.2 são apresentadas as características efetivas adotadas para o cálculo estrutural.

Tabela 4.2 – Propriedades das secções

	Simplex	Dupla	Tubular
Secção			
A_{eff} (mm ²)	310.19	620.38	1091.2
$I_{eff,y}$ (mm ⁴)	1462829	2925658	9195248
$I_{eff,z}$ (mm ⁴)	931629	1863258	2571385
I_T (mm ⁴)	464.3	928.6	938
I_w (mm ⁶)	1176300000	2352600000	197894880279

De forma a validar estas propriedades e as demais necessárias para a análise estrutural, foi utilizado o programa CUFSM [32], dedicado à determinação das tensões críticas de instabilidade dos diferentes modos de encurvadura referentes a perfis de aço enformados a frio.

4.2. AÇÕES DE CÁLCULO

O projeto de uma estrutura metálica, tal como qualquer outra estrutura de engenharia, inicia-se com a definição e quantificação das ações a que a estrutura poderá estar sujeita ao longo do seu tempo de vida útil. Segundo o Eurocódigo, uma ação define-se como um conjunto de forças aplicadas à estrutura, e como tal, as ações constituem as peças fundamentais para o dimensionamento desta.

Todas as ações foram definidas pelas prescrições dos Eurocódigos, nomeadamente, o Eurocódigo 0 (EC0), Eurocódigo 1 (EC1), Eurocódigo 2 (EC2), Eurocódigo 3 (EC3) e o Eurocódigo 8 (EC8). As ações condicionantes e consideradas no dimensionamento da estrutura são adaptadas à localização geográfica da estrutura em estudo, que se considerou ser Oliveira de Frades.

De acordo com a sua variação temporal, as ações classificam-se como: permanentes (G) (com elevada probabilidade de atuar durante um período de referência e cuja variação de intensidade no tempo é desprezável ou é sempre no mesmo sentido até atingir um valor limite. Exemplos destas ações são os pesos próprios de estruturas e equipamentos); variáveis (Q) (cuja variação de intensidade no tempo não é desprezável nem monótona, como é o caso das sobrecargas sobre pavimentos e coberturas, a ação da neve e do vento); e, por último, ações de acidente (A) (como incêndios, sismos e explosões, que são normalmente de curta duração, com baixa probabilidade de ocorrência, mas com intensidade significativa).

O valor característico (F_k) de uma ação é o seu valor representativo especificado como um valor médio, um valor superior ou inferior, ou um valor nominal, dependendo da natureza da ação. Os valores característicos das ações são quantificados nas diversas partes do Eurocódigo 1 que servem de referência a este projeto.

As ações permanentes a considerar neste projeto, dada a invariabilidade no espaço e no tempo, correspondem a um valor característico G_k único, especificado em função das dimensões da estrutura e dos valores médios das massas volúmicas dos materiais. Assim sendo, são consideradas as seguintes cargas permanentes: peso próprio da estrutura metálica, peso próprio dos painéis fotovoltaicos e sistema de ligação e ainda peso próprio do inversor.

O peso específico das estruturas metálicas, segundo o EC2, será admitido igual a 77.0 kN/m^3 .

Já o peso próprio dos painéis fotovoltaicos é determinado pela razão entre a massa de cada painel e a sua área. De forma a contabilizar o peso do sistema de ligação, majorou-se a ação anterior em 15%. Desta forma, resulta uma carga distribuída de superfície de valor dado por:

$$PP_{PV} = \frac{0,20}{1,639 \times 0,982} \times \frac{1}{\cos(10)} \times 1,15 = 0,1451 \text{ kN/m}^2 \approx 0,15 \text{ kN/m}^2$$

A carga relativa ao inversor é colocada no topo do pilar mais alto, de cada pórtico, e equivale a 0.35 kN .

Como ações variáveis (Q) foram consideradas as seguintes: o vento e a neve. A ação da sobrecarga não é considerada, já que a cobertura não é acessível. Como os furos dos perfis enformados a frio são ovalizados, a ação da variação da temperatura não será relevante, consequentemente esta ação não influenciará o dimensionamento da estrutura.

Será analisado o comportamento da estrutura na ocorrência de um sismo, que normalmente é uma ação de curta duração, com baixa probabilidade de ocorrência, mas com intensidade significativa.

Os valores característicos das ações variáveis, por si só, não permitem estabelecer as situações de projeto relevantes, pelo que outros valores representativos devem ser considerados: o valor de combinação ($\psi_0 Q_k$) utilizado para a verificação de estados limites últimos, e estados limites de utilização irreversíveis; o valor frequente ($\psi_1 Q_k$), para verificação de estados limite últimos envolvendo ações de acidente e estados limites de utilização reversíveis; e o valor quase-permanente, representado pelo produto ($\psi_2 Q_k$), e utilizados para o cálculo de efeitos a longo prazo.

4.2.1. AÇÃO DO VENTO

As coberturas isoladas são muito sensíveis a ação do vento e devem ser projetadas para suportar forças em duas direções ortogonais. Daqui podem resultar forças de sobrepressão e de sucção, alternando conforme a incidência do vento.

A ação do vento foi assimilada a um conjunto de forças estáticas equivalentes. Deste modo, o cálculo das forças resultantes segue o EN1991-1.4 (EC1-1.4). A tipologia apresentada no EC1 que melhor se adequa ao sistema estrutural em estudo, é exposta na secção 7.4 deste documento, dedicada a coberturas isoladas.

A caracterização do terreno é essencial para a definição da ação do vento. Tendo em conta a localização da estrutura, o terreno em questão está incluído na zona A, consequentemente, o valor básico de referência do vento, $v_{b,0}$, corresponde a 27 m/s. A influência da altitude reflete-se no valor de referência tido em conta no zonamento do país.

Contudo, o valor de referência da velocidade do vento (v_b), ou seja, o valor definido em função da direção do vento e da época do ano a uma altura de 10 m acima da superfície de um terreno da categoria II, é dado por:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (4.1)$$

Em que:

- c_{dir} - coeficiente de direção (valor recomendado de 1.0, sem direção particular do vento);
- c_{season} - coeficiente de sazão (valor recomendado de 1.0).

A velocidade média do vento, $v_m(z)$, em função da altura z , depende da rugosidade e orografia do terreno e ainda da velocidade básica anteriormente definida.

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (4.2)$$

Em que:

- $c_r(z)$ – coeficiente de rugosidade;
- $c_o(z)$ – coeficiente de orografia (valor igual a 1.0, salvo exceções EC1-1.4-4.3.3).

O fator de rugosidade, $c_r(z)$, depende das características do terreno que, neste caso, se enquadra na categoria II, de acordo com o EC1. Este define-se pelas seguintes expressões:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.3)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{para } z \leq z_{\min} \quad (4.4)$$

Em que:

- z_0 – comprimento de rugosidade;
- k_r – coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade, calculado através de:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (4.5)$$

Em que:

- $z_{0,II}$ – comprimento de rugosidade. Para terreno categoria II, $z_{0,II} = 0,05$;
- z_{\min} – altura mínima;
- z_{\max} – considerar 200m.

A intensidade de turbulência à altura z , $I_v(z)$, define-se através de:

$$I_v = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_l}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (4.6)$$

Em que:

- σ_v - desvio padrão da turbulência;
- k_l – coeficiente de turbulência (assume o valor de 1, indicado no Anexo Nacional em NA-4.5).

Em coberturas isoladas devem ser utilizados os coeficientes de pressão resultante, $c_{p,net}$. Estes fornecem o efeito conjunto das pressões exteriores e interiores do vento sobre um elemento estrutural.

O coeficiente de força global, c_f , traduz a força resultante, enquanto os coeficientes de pressão resultante, $c_{p,net}$, representam a pressão local máxima para todas as direções do vento.

A pressão dinâmica de pico, $q_p(z)$, resulta das flutuações de curta duração da velocidade do vento. Consoante a altura z do edifício, a pressão dinâmica de pico determina-se através da seguinte expressão:

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) \quad (4.7)$$

Em que ρ é a massa volúmica do ar, cujo valor recomendado é de 1,25 kg/m³.

A pressão exercida pelo vento será obtida pela seguinte expressão:

$$w = c_{p,net} \cdot q_p(z) \quad (4.8)$$

Na tabela 4.3 são apresentados os parâmetros referidos anteriormente para a definição da ação do vento, tendo em conta a localização da estrutura em estudo.

Tabela 4.3 – Parâmetros da ação do vento

Zona A	
v_b (m/s)	27
$z=z_e$ (m)	4,80
Terreno Categoria II	
z_0 (m)	0,05
z_{min} (m)	3
c_0 (z)	1
c_e (z)	1,905
k_r	0,190
c_r (z)	0,867
v_m (m/s)	23,415
l_v (z)	0,219
q_p (z)	0,868

A determinação destes parâmetros constitui apenas uma etapa na caracterização da pressão exercida pelo vento nas superfícies. Será necessário de seguida contabilizar as forças e pressões daí resultantes.

A estrutura em estudo é composta por uma cobertura isolada, sem paredes permanentes. Contudo, o grau de obstrução (ϕ), quociente entre a área de eventuais obstáculos sob a cobertura e a área da secção transversal da cobertura, varia consoante a ocupação do espaço sob esta. Devido à presença expectável de carros, adotou-se para este coeficiente o valor de 0.8.

O coeficiente de pressão resultante, $c_{p,net}$, deve ser utilizado no cálculo dos elementos de cobertura, ou seja, na análise da estrutura secundária. Estes coeficientes estão definidos para as zonas de A a C, ilustradas na Fig.4.4 e são obtidos pelo Quadro 7.6 do EC1-1-4.

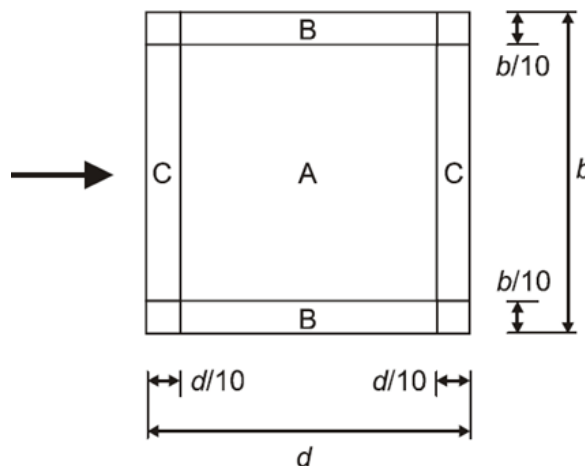


Fig.4.4 – Zonas de diferente pressão da ação do vento

Para o cálculo da estrutura principal será utilizado o coeficiente de força. O centro de pressão, referente às forças geradas por este coeficiente, deve estar posicionado a uma distância $d/4$ do bordo de barlavento (d é a dimensão na direção do vento). O coeficiente c_f é definido no EC1-1-4. A estrutura deve resistir aos casos de carga indicados na Fig.4.5.

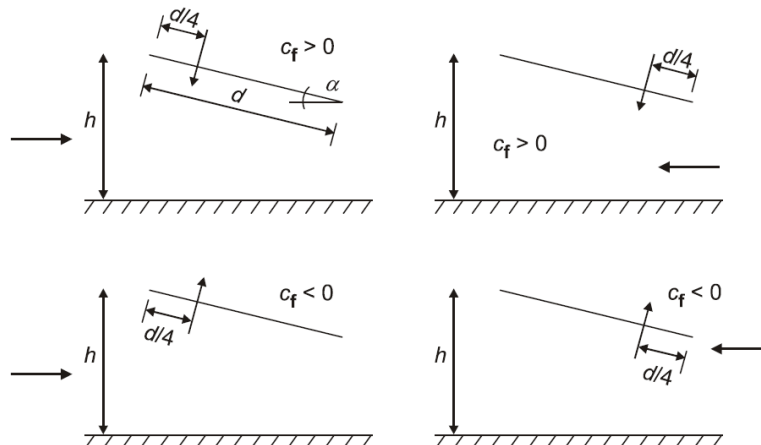


Fig.4.5 – Casos de carga (c_f) e respetiva localização de centro de pressão

A força exercida pelo vento, F_w , poderá ser determinada através da seguinte expressão:

$$F_w = c_d c_s \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot A_{ref} \quad (4.9)$$

Onde:

- $c_d c_s$ – coeficiente estrutural;
- A_{ref} – área de referência do elemento, ou seja, área projetada da face perpendicular à atuação do vento.

O coeficiente estrutural, $c_d c_s$, que engloba o efeito da não simultaneidade de ocorrência das pressões de pico em conjunto com o efeito da turbulência, neste caso, por se tratar de um edifício com altura inferior a 15 metros, é igual a um.

Os resultados obtidos, forças e pressões resultantes da ação do vento, são apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Força e pressão da ação do vento

Obstrução	Coeficiente de força global c_f	Coeficiente de pressão resultante $c_{p,net}$		
		Zona A	Zona B	Zona C
Máximo	0,5	1,2	2,4	1,6
Mínimo, $\phi=0,8$	-1,3	-1,58	-2,48	-2,58
F_w (kN)		w (kN/m ²)		
Máximo	8,77	1,04	2,08	1,39
Mínimo, $\phi=0,8$	-22,80	-1,37	-2,15	-2,24

Por último, serão consideradas as forças de atrito, F_{fr} . Estas são definidas pela seguinte expressão:

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z) \cdot A_{fr} \quad (4.10)$$

Em que:

- c_{fr} – coeficiente de atrito;
- A_{fr} – área de superfície exterior paralela ao vento.

A estrutura é composta por aço, material que, segundo o EC1 apresenta uma superfície lisa, logo o coeficiente de atrito deve tomar o valor de 0,01. Consequentemente, a força de atrito vale 2,21 kN. Esta força deve ser aplicada a uma distância do bordo do elemento correspondente ao menor valor entre, duas vezes a dimensão transversal do elemento ao vento ou, quatro vezes a espessura do elemento de cobertura.

4.2.2. AÇÃO DA NEVE

A ação da neve sobre uma estrutura é caracterizada segundo o EC1-1.3 como uma ação variável fixa. Nesta norma também está prevista a possibilidade de queda de neve excecional em função da localização geográfica, sendo neste caso tratada como uma ação accidental.

O valor característico da carga da neve ao nível do solo, s_k , é definido em Anexo Nacional, de acordo com a zona do território.

$$s_k = C_z \cdot \left[1 + \left(\frac{H}{500} \right)^2 \right] \quad (4.11)$$

Onde:

- C_z – coeficiente dependente da zona;
- H – altitude do local, em metros.

Segundo a localização da estrutura, para efeito da determinação dos valores das cargas devidas à neve, a zona em questão está incluída na área Z2 e encontra-se a uma altitude de 400 m. Neste caso, s_k é obtido por:

$$s_k = 0.2 \cdot \left[1 + \left(\frac{400}{500} \right)^2 \right] = 0.328$$

O Anexo Nacional refere que, à zona Z2, se aplica o caso A do Quadro NA – A.1, ou seja, a queda de neve não será uma ação accidental. Apenas se estuda a situação de projeto persistente/transitória, sendo que a carga da neve na cobertura, para os casos de neve deslocada e não deslocada, é obtida por:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (4.12)$$

Em que:

- μ_i - coeficiente de forma da cobertura;
- C_e - coeficiente exposição (valor recomendado de 1.00 para topografia normal - Quadro 5.1, EC1-1.3);
- C_t - coeficiente térmico (valor recomendado de 1.00 para coberturas em que a fusão da neve devida ao fluxo térmico pode ser desprezada).

O coeficiente de forma, μ_i , para coberturas com apenas uma vertente, com inclinação entre 0° e 30° , é igual a 0,8. A disposição de carga relativamente à neve, deslocada ou não deslocada, encontra-se representada na Fig.4.6.

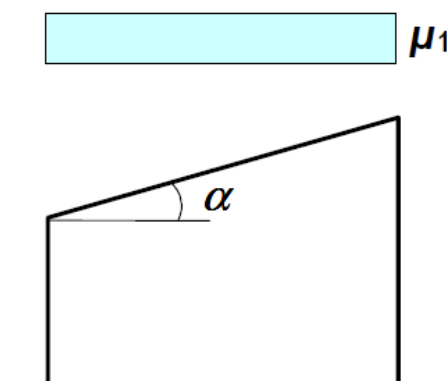


Fig.4.6 - Coeficiente de forma para a carga da neve (disposição de carga EC1)

Por fim, a carga de neve determinada desta forma equivale a:

$$s = 0.8 \times 1.0 \times 1.0 \times 0.328 = 0.26 \text{ kN/m}^2$$

4.2.3. AÇÃO DO SISMO

A análise sísmica de uma estrutura é essencial ao nível de projeto, pois a ocorrência de um sismo pode levar a graves danos na estrutura, ou mesmo ao seu colapso.

A análise elaborada considerou a ação sísmica regulamentar preconizada no EC8 [33], nomeadamente no anexo nacional, adotando as especificações relativas do local (Oliveira de Azeméis). Não são conhecidos os dados geológicos concretos, contudo, especulou-se que o terreno em questão será do tipo B, uma vez que esta zona se encontra numa área montanhosa constituída, principalmente, por granito.

Segundo o EC8, são definidos dois tipos de ação sísmica: o sismo próximo, ou ação sísmica do tipo 1, caracterizado por uma magnitude moderada e pequena distância focal, e o sismo afastado, ou ação sísmica do tipo 2, caracterizado por uma maior magnitude a uma distância focal maior.

Com base no zonamento sísmico e caracterização do terreno, são definidos os parâmetros de cálculo desta ação, tabela 4.5:

Tabela 4.5 – Definição da ação sísmica

Ação Sísmica	Zona Sísmica	a_{gr} (m/s ²)	S_{max}	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
1	1.6	0,35	1,35	0,1	0,6	2,0
2	2.4	1,1	1,35	0,1	0,25	2,0

Os valores explicitados acima dão origem ao espectro de cálculo, $S_d(T)$, definido pelas seguintes expressões:

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (4.13)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (4.14)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \geq \beta \cdot a_g \quad (4.15)$$

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \geq \beta \cdot a_g \quad (4.16)$$

Em que:

- $S_d(T)$ - espectro de cálculo;
- T - período de vibração de um sistema linear de um grau de liberdade;
- a_g - valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A ($a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$);
- T_B - limite inferior do período no ramo espectral de aceleração constante;
- T_C - limite superior do período no ramo espectral de aceleração constante;
- T_D - valor que define o início do ramo de deslocamento constante;
- S - fator de terreno;
- β - coeficiente correspondente ao limite inferior do espectro de resposta de cálculo horizontal;
- q - coeficiente de comportamento;
- γ_I - coeficiente de importância.

Pelo lado da segurança, à estrutura em causa foi associada uma classe de importância II, consequentemente, a_{gR} coincide com a_g .

O coeficiente de comportamento, q , é uma aproximação da razão das forças sísmicas a que a estrutura ficaria sujeita se a resposta fosse completamente elástica, e as forças sísmicas que poderão ser adotadas no projeto, com um modelo de análise elástica convencional, que continuem a assegurar uma resposta satisfatória da estrutura (comportamento não linear). A estrutura em causa não contempla as características expostas no EC8 quanto à determinação do coeficiente de comportamento. Deste modo, este foi limitado a 1.5, o que deverá ser conservativo.

O espectro de cálculo considerado no dimensionamento, tendo em conta as ações do tipo I e II para um solo da categoria B, está representado na Fig.4.7. A ação sísmica condicionante, perante os resultados expostos, corresponde ao sismo próximo (Sismo de tipo II – EC8).

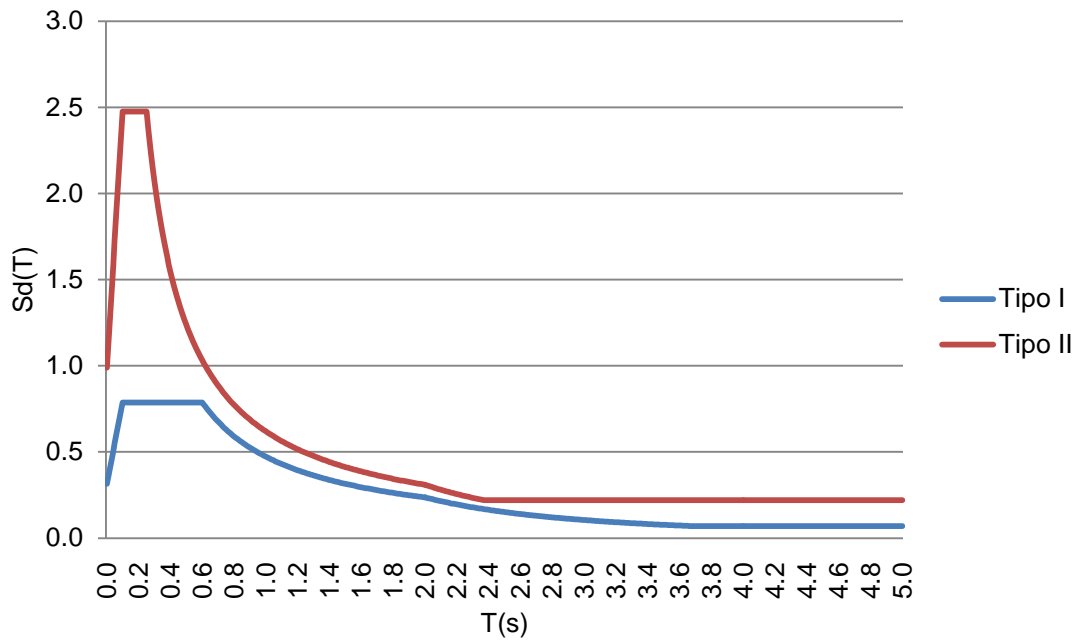


Fig.4.7 – Espectros de cálculo para solo do tipo B

4.3. COMBINAÇÃO DE AÇÕES

Em geral, o valor de cálculo de uma ação é expresso por:

$$F_d = \gamma_F F_k \quad (4.17)$$

Em que γ_F é o coeficiente parcial de segurança da ação considerada atendendo a possíveis variações desfavoráveis, imprecisões na sua modelação e incertezas na avaliação dos efeitos das ações.

Os valores de cálculo dos efeitos das ações (E_d) correspondem à resposta das estruturas (esforços, tensões e deformações) e determinam-se a partir dos valores de cálculo das ações com base nas regras de combinação que, para o caso do projeto de edifícios metálicos, são:

- Situações de projeto persistentes e transitórias para verificações que não se relacionem com fadiga (combinações fundamentais):

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4.18)$$

- Combinação de ação sísmica:

$$\sum G_{k,j} + A_{Ed} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4.19)$$

Em que:

- $G_{k,j}$ - Valores característicos das ações permanentes;
- $Q_{k,1}$ - Valor característico da ação variável base;
- $Q_{k,i}$ - Valor característico de outras ações variáveis;
- A_{Ed} - Valor de cálculo da ação sísmica;
- $\gamma_{G,j}$ - Coeficientes parciais de segurança para as ações permanentes $G_{k,j}$;
- $\gamma_{Q,i}$ - Coeficientes parciais de segurança para as ações variáveis $Q_{k,i}$.

Para verificação de segurança em estado limite de utilização, foi utilizada a combinação de ações frequente, que corresponde a estados limites de curta duração:

$$\sum G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4.20)$$

Os coeficientes ψ_0 , ψ_1 , e ψ_2 são específicos para cada ação e encontram-se definidos no Anexo A do EC0. Os coeficientes usados de forma a definir os valores representativos das ações variáveis, estão apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Coeficientes ψ

Ação	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Neve	0,50	0,20	0,00
Vento	0,60	0,20	0,00

Os coeficientes parciais de segurança para o caso da verificação ao Estado Limite Último (ELU) serão dados por:

- $\gamma_G = 1,35$ – no caso de ações desfavoráveis;
- $\gamma_G = 1,00$ – no caso de ações favoráveis;
- $\gamma_Q = 1,50$ – no caso de ações desfavoráveis;
- $\gamma_Q = 0,00$ – no caso de ações favoráveis.

As combinações geradas para Estado Limite Último são as seguintes:

- Ação Base – Neve

$$s_d = 1,35.S_{G_k} + 1,5.(S_{s_k} + 0,6.S_{w_k}(\text{pressão})) \quad (4.21)$$

- Ação Base – Vento

$$s_d = 1,35.S_{G_k} + 1,5.(S_{w_k}(\text{pressão}) + 0,5.S_{s_k}) \quad (4.22)$$

$$s_d = 1,00.S_{G_k} + 1,5.(S_{w_k}(\text{sucção})) \quad (4.23)$$

- Ação Sísmica

$$s_d = 1,00.S_{G_k} + A_{Ed} \quad (4.24)$$

As combinações geradas para Estado Limite Utilização são as seguintes:

- Ação Base – Neve

$$s_d = 1,00.S_{G_k} + 1,00.(0,2.S_{s_k}) \quad (4.25)$$

- Ação Base – Vento

$$s_d = 1,00.S_{G_k} + 1,00.(0,2.S_{w_k}(\text{pressão})) \quad (4.26)$$

$$s_d = 1,00.S_{G_k} + 1,00.(0,2.S_{w_k}(\text{sucção})) \quad (4.27)$$

4.4. ANÁLISE ESTRUTURAL

Na construção metálica são utilizados três tipos de elementos estruturais de aço: perfis laminados a quente, perfis de chapa soldada e perfis de chapa fina enformados a frio. Este último tipo de elementos estruturais metálicos, com uma crescente utilização na indústria da construção, é obtido a partir de chapas de pequena espessura, através da dobragem destas por meios mecânicos (quinagem e laminação a frio) obtendo-se assim a forma desejada, tipicamente definida por dobras principais que definem almas e banzos, e dobras intermédias ou de extremidade que definem reforços que aumentam a rigidez das suas paredes [34].

O uso deste tipo de perfis advém de um conjunto de vantagens, das quais se destacam: elevada eficiência estrutural, expressa pela boa relação entre a elevada resistência mecânica e o reduzido peso; grande versatilidade de fabrico, traduzida pela possibilidade de produzir economicamente elementos com uma gama variadíssima de geometrias e dimensões; algumas secções são produzidas com a possibilidade de encaixarem sucessivamente umas nas outras, permitindo uma maior economia no seu armazenamento e transporte; possibilidade de pré-fabricação em larga escala; elevada rapidez de montagem; grande facilidade de manutenção; inexistência de retração e/ou fluência à temperatura ambiente; inexistência de suscetibilidade ao ataque de fungos, xilófagos e térmitas.

Contudo, existem algumas desvantagens na utilização deste tipo de perfis, tais como: o comportamento estrutural que envolve vários fenómenos de instabilidade, alguns inexistentes ou pouco relevantes nos perfis de aço laminados a quente; o cálculo de resistência de secções e barras mais complexo que noutros tipos de elementos estruturais de aço; permitem apenas soluções relativamente tipificadas e limitadas[35].

Os perfis laminados a frio de espessura reduzida são secções de classe 4, devido à sua elevada esbelteza. Como é referido no EC3, as secções transversais da classe 4 são aquelas em que, devido aos efeitos de encurvadura local, a rutura ocorre antes de se esgotar a resistência elástica do material. Na prática, este conceito traduz-se pela redução da área útil da secção, com consequente diminuição das suas propriedades de resistência.

Na análise e dimensionamento de perfis de aço enformados a frio com secção aberta, são vários os aspetos que influenciam. De seguida são apresentados, resumidamente, os mais relevantes [36]:

- Fenómenos de instabilidade local e/ou global, devidos, sobretudo à elevada esbelteza das chapas que constituem o perfil e à baixa rigidez de torção das secções;
- Grande deformabilidade à torção, associada à baixa rigidez de torção das secções de parede fina aberta e ao facto de, para um grande número de secções correntes, o centro de corte não coincidir com o centro de gravidade;
- Empenamento das secções sujeitas a momento torsor, associado às características geométricas da secção e às condições de fronteira;
- Reforços de extremidade que melhoram o comportamento estrutural das paredes comprimidas do perfil;
- Endurecimento do aço na zona dos bordos do perfil (zona da chapa de aço que foi dobrada) e a sua influência no aumento da tensão de cedência e diminuição da ductilidade;
- Colapso da alma devido à aplicação de forças concentradas;
- Especificidade das ligações, já que os modos de colapso, tanto para ligações soldadas como para ligações aparafusadas, são diferentes dos observados em estruturas de perfis de aço laminados a quente.

Desta forma, o dimensionamento de perfis de aço enformados a frio, dada a sua elevada esbelteza, obriga à consideração dos fenómenos de encurvadura local para além dos fenómenos de encurvadura global. Esta complexidade acrescida, em particular no que toca à previsão do modo distorcional, levou à criação da parte 1-3 do EC3 [37], a qual fornece os procedimentos para o dimensionamento de perfis de aço enformados a frio.

De acordo com o exposto, o dimensionamento de elementos enformados a frio é feito com base no método das secções efetivas. Este método considera a redução da resistência da secção devido à encurvadura local através da redução da dimensão de cada um dos elementos da secção transversal (secção efetiva).

Secções transversais impedidas de deformar lateralmente e/ou à torção podem ainda sofrer de encurvadura normalmente designado de encurvadura por distorção. Este modo de encurvadura pode ocorrer em membros comprimidos e /ou fletidos. O Eurocódigo 3, parte 1-3, considera a redução da resistência da secção devido à encurvadura por distorção através da redução da espessura do reforço.

4.4.1. ANÁLISE ESTRUTURAL PELO EC3

A análise da segurança em relação aos estados limites últimos de estabilidade de perfis de aço enformados a frio é feita, pelo EC3, usando a mesma metodologia adaptada para perfis convencionais. Algumas diferenças prendem-se com a escolha das curvas de encurvadura e o cuidado adicional de verificação da instabilidade devido à torção, já que em algumas secções de parede fina aberta, esta pode ser condicionante.

As imperfeições geométricas não foram consideradas na análise global, consequência da condição do EC3 que permite a sua omissão sempre que as forças horizontais sejam superiores a 15% das forças verticais.

No que diz respeito à classificação da estrutura relativamente à necessidade de considerar os efeitos de 2ª ordem, isto é, de estabelecer o equilíbrio da estrutura na sua configuração deformada (não linearidade geométrica), o EC3-Parte 1.1 preconiza que estes podem ser desprezados, numa análise elástica, se:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \quad (4.28)$$

Onde:

- F_{Ed} - Valor de cálculo do carregamento da estrutura;
- F_{cr} - Valor crítico do carregamento associado à instabilidade elástica num modo global com deslocamentos laterais, determinado com base nos valores de rigidez iniciais.

O EC3 permite, segundo determinados critérios, o cálculo do α_{cr} pela seguinte fórmula:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) \quad (4.29)$$

Em que:

- H_{Ed} - Valor de cálculo da carga horizontal total;
- V_{Ed} - Valor de cálculo da carga vertical total transmitida pelo piso;

- $\delta_{H,Ed}$ – Deslocamento horizontal no topo do piso, medido em relação à sua base, quando se considera um carregamento do pórtico definido pelos valores de cálculo das ações horizontais e das cargas horizontais fictícias, aplicadas ao nível de cada piso;
- h – Altura do piso.

A estrutura em estudo foi classificada como sendo de nós fixos, uma vez que o fator pelo qual as ações de cálculo teriam de ser multiplicadas para provocar a instabilidade elástica num modo global, ou seja o α_{cr} , é substancialmente superior a 10. Foi considerada a altura do menor pilar de forma a obter o fator mais desfavorável. Nestas condições, o valor de α_{cr} calculado é de:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{108,9}{11,5} \right) \left(\frac{3,3}{0,02} \right) = 1562$$

Conclui-se que poderá efetuar-se uma análise linear elástica, uma vez que os efeitos de segunda ordem, segundo o EC3, são desprezáveis.

Após a escolha do método de análise da estrutura e a determinação dos valores de cálculo dos esforços de dimensionamento, procede-se à verificação de segurança da estrutura. De acordo com o EC3, a verificação de segurança de uma estrutura contabiliza dois aspetos fundamentais, os quais estão relacionados com a verificação de segurança das secções e a verificação global de segurança das barras.

A verificação de segurança de uma secção tem como objetivo limitar a tensão máxima numa secção à tensão de cedência do material. Como numa secção atuam simultaneamente diferentes tipos de esforços, a verificação terá de ter em consideração o efeito da interação entre esforços. O EC3 considera quatro tipos de verificação de segurança de uma secção, consoante o esforço a que está submetida: esforço axial, momento fletor, esforço transversal e momento torsor. Partindo de secções de classe 4, é necessário efetuar as verificações de segurança para esforços isolados associados a tensões normais, de acordo com:

$$N_{Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.30)$$

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{eff,y,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.31)$$

$$M_{z,Rd} = \frac{W_{eff,z,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.32)$$

No caso mais geral, os três esforços existem em simultâneo e o EC3 preconiza, em substituição da expressão (3.18), a adoção da seguinte fórmula de interação:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{y,Rd} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min}} + \frac{M_{z,Rd} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.33)$$

Em que:

- e_N - Valor da excentricidade do esforço normal atuante, N_{Ed} , na secção efetiva, cujo centro de massa sofreu uma mudança de posição relativamente à secção bruta.

A verificação global de segurança de uma barra tem como objetivo limitar um esforço (ou combinação de esforços), associado a tensões normais, a um valor limite que tem em consideração a influência de possíveis fenómenos de instabilidade global da barra.

Apresentam-se na Fig.4.8 os fluxogramas que descrevem a verificação global da estabilidade de barras segundo o EC3. De acordo com esta figura, os diagramas 1, 2 e 3, traduzem as metodologias de verificação correspondentes aos modos de estabilidade de colunas, vigas ou viga-coluna, que são explicitados através do fluxograma da Fig.4.9 a 4.11.

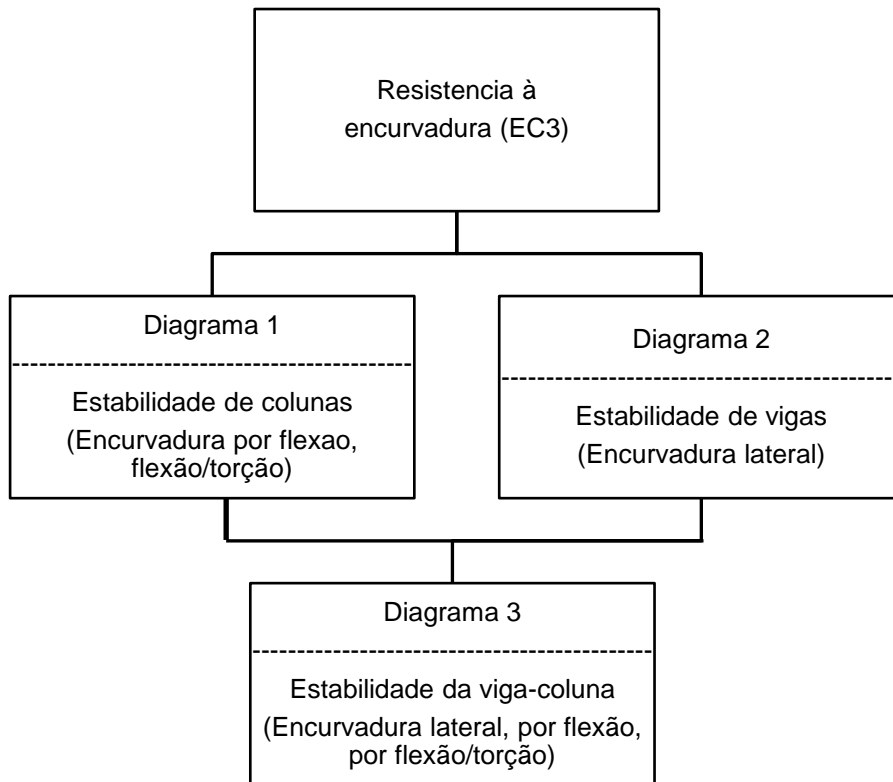


Fig.4.8 – Fluxograma de verificação da segurança ao ELU de estabilidade [34]

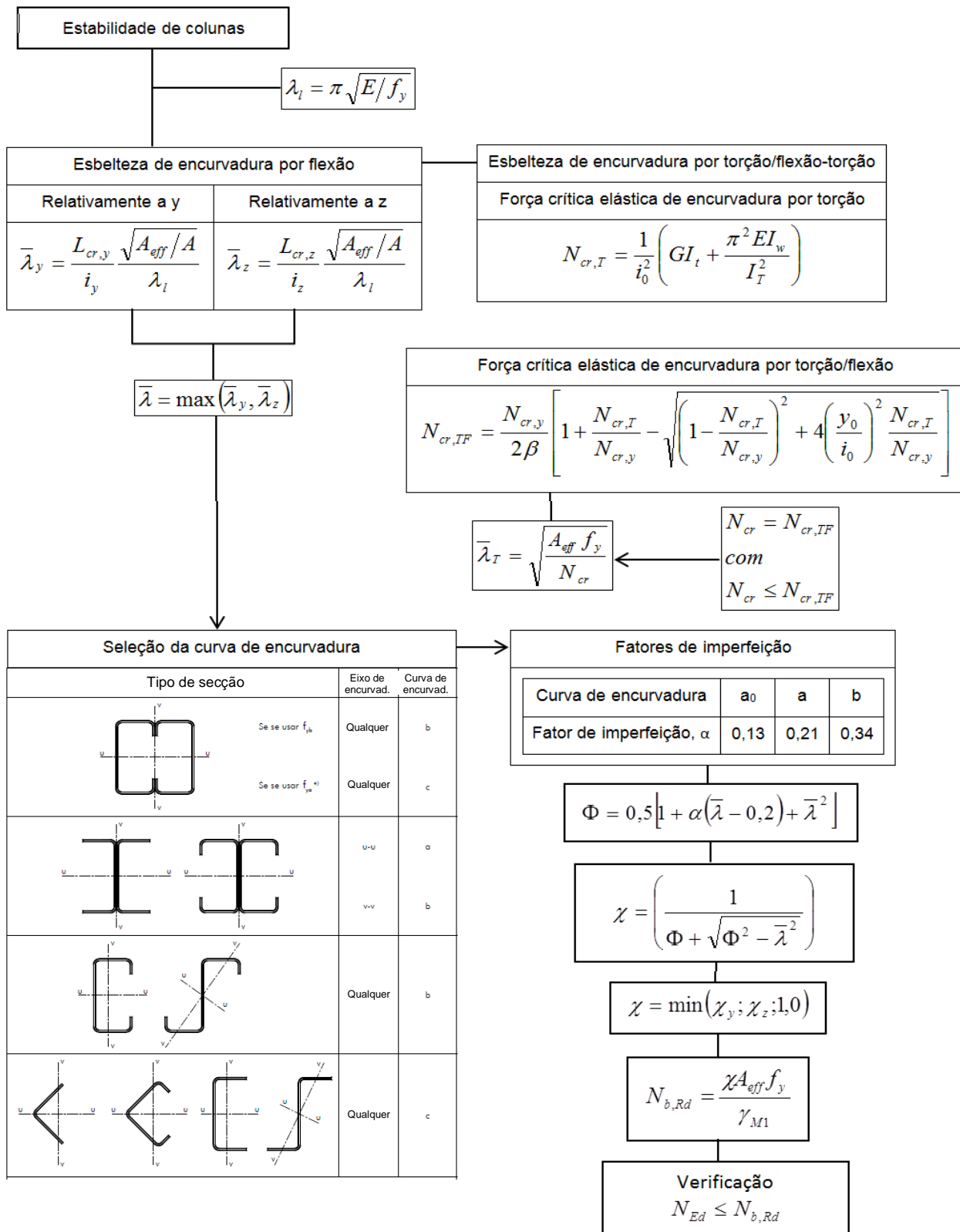


Fig.4.9 – Diagrama 1 - Verificação da segurança de colunas: encurvadura por flexão e encurvadura por flexão/torção [34]

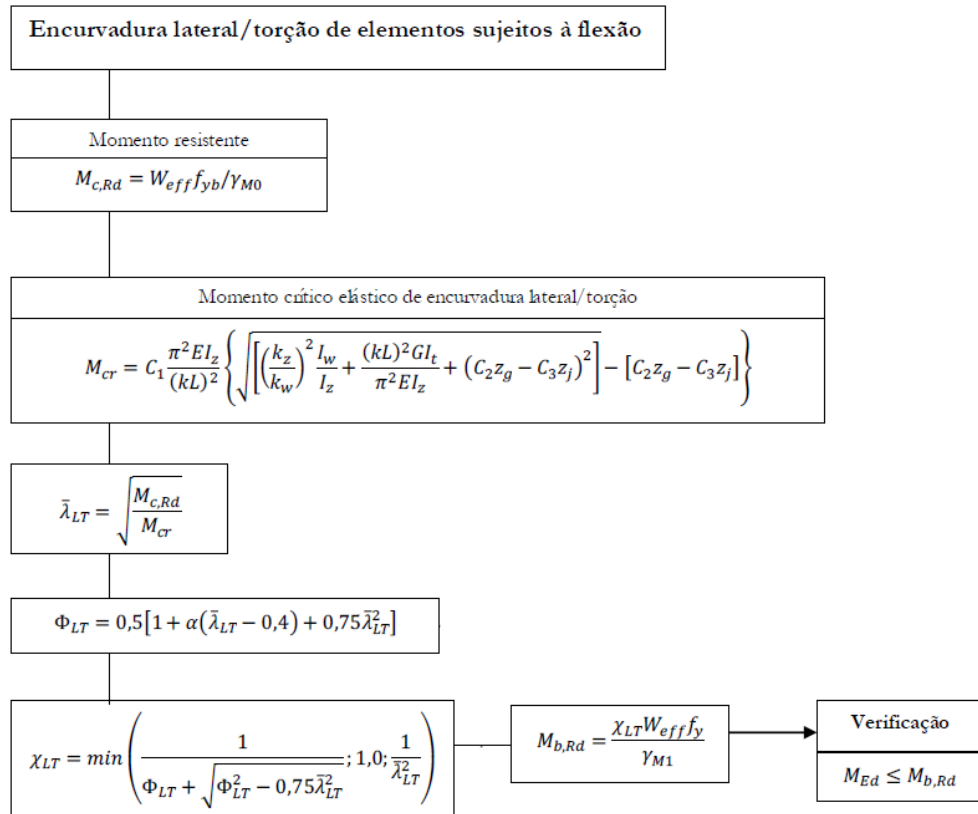


Fig.4.10 – Diagrama 2 - Verificação da segurança de vigas: encurvadura lateral [34]

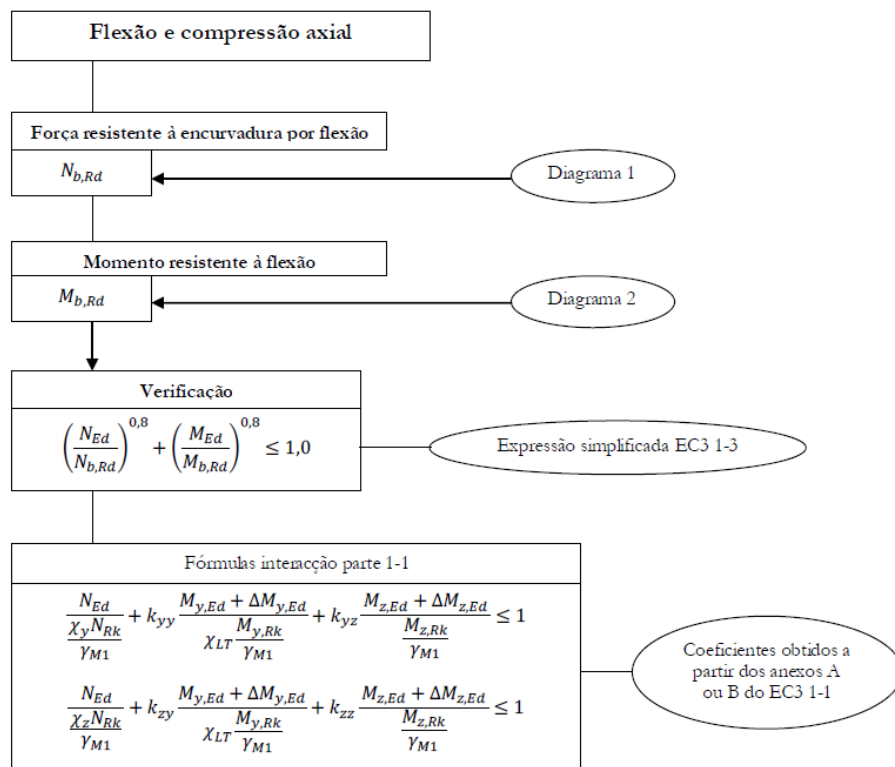


Fig.4.11 – Diagrama 3 - Verificação da segurança de viga-coluna: Encurvadura lateral, flexão, flexão/torção [34]

Perante estas condições, procede-se à verificação de estabilidade da estrutura, atendendo à envolvente de esforços das combinações em ELU. A estrutura é condicionada pela ação do vento, sendo esta a que origina maiores esforços. Por outro lado, o sismo não gera esforços relevantes para o comportamento da estrutura, dado o reduzido peso desta.

Para auxiliar o processo de cálculo, foi criada uma folha em Excel, onde se analisam os esforços individualmente e a interação entre si. De seguida, apenas serão expostos os resultados do programa de cálculo e as considerações relevantes para a análise de estabilidade da estrutura. No anexo 2 são apresentadas as folhas de cálculo, para verificação e apoio à discussão dos resultados.

A análise desta estrutura não tem como objetivo a verificação completa e pormenorizada de todos os seus componentes, apenas é pretendido compreender o seu comportamento global, os esforços a que está sujeita e as deformações que sofre.

Tratando-se apenas de uma verificação de segurança e por não se enquadrar no âmbito da tese, apenas serão analisadas as componentes de aço enformado a frio.

Apresentam-se de seguida as notas de cálculo referentes ao dimensionamento da estrutura principal, constituída por dois pórticos extremos e um intermédio.

Os coeficientes parciais de segurança para verificação em estados limites últimos, γ_{M0} , referente à resistência das secções transversais, e γ_{M1} , referente à resistência de elementos que sofrem fenómenos de encurvadura, tomam o valor de 1,0, segundo o EC3.

Para verificação do esforço transversal foi adotada a metodologia do EC3 Parte-1.3, secção 6.1.5. A área de corte admitida restringe-se às paredes intermédias, que atuam como almas. O esforço resistente calculado foi substancialmente superior ao atuante, o que permitiu a verificação da segurança e ainda a dispensa da análise de interação entre esforços, visto que o esforço transversal atuante é inferior a 50 % da capacidade resistente ao esforço transversal.

Tabela 4.7 – Verificação ao esforço transversal da secção $\Omega 150 \times 1.5$

	Secção Simples	Secção Dupla	Secção Tubular
$A_v \text{ (mm}^2\text{)}$	0,453	0.906	0.906
$V_{c,Rd} \text{ (kN)}$	83	163	163
$V_{Ed,m\acute{a}x} \text{ (kN)}$	2,00	9,86	10,83

Seguindo para a análise do pórtico de extremidade, comprova-se pela Fig.4.12, que o esforço máximo de compressão se dá no pilar mais curto. Contudo, serão verificados os esforços na viga devido à alteração de secção, tanto na zona de secção simples, como na zona de reforço.

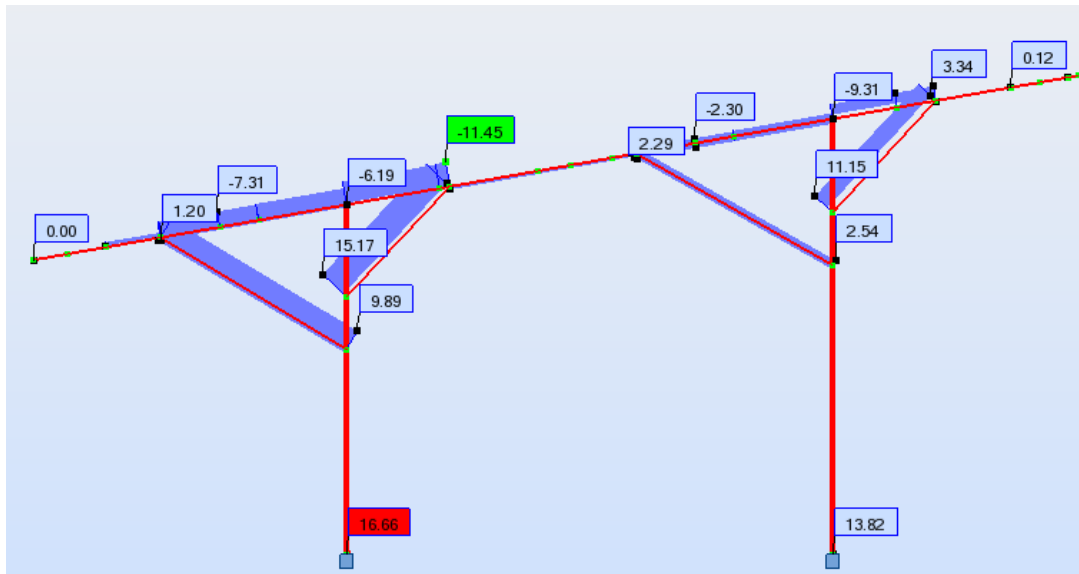


Fig.4.12 – Diagrama de esforço axial para a envolvente das combinações em ELU (kN) – Pórtico Extremidade

O comprimento de encurvadura considerado na direção paralela ao pórtico foi de 2,5 metros, sendo este o comprimento entre a diagonal e a base do pilar. Na direção transversal ao pórtico foi considerado um comprimento de encurvadura de 3,3 metros, o comprimento total do pilar. Ambos os valores foram tomados pelo lado da segurança, atendendo à dificuldade de assegurar o encastramento na base do pilar. A curva de encurvadura apropriada para a secção tubular, segundo o EC3-Parte-1-3, é a curva b, uma vez que a secção é duplamente simétrica. Por consequência, a resistência da secção tubular à compressão simples, nesta situação, é de 254 kN.

No caso da viga, o esforço axial relevante tem o valor de 11,45 kN. Contudo, por ocorrer numa zona reforçada e o comprimento de encurvadura adotado ser igual a 1,0 metro, sendo este o comprimento entre a ligação com o pilar e com a diagonal, a segurança é verificada.

O fator de imperfeição para a encurvadura lateral, segundo o EC3-Parte1-3, é igual a 0,34, tanto para a secção simples como para a secção dupla.

Na Fig.4.13 são representados os momentos fletores atuantes no pórtico de extremidade. Será analisado o momento na base do pilar mais curto, além de ser próximo do momento máximo permite a posterior análise da interação entre esforços.

O valor de k_w foi tomado como 1,0, uma vez que não há restrição ao empenamento. O parâmetro C_1 permite considerar os efeitos de carregamento. Contudo, por simplificação e atuando pelo lado da segurança, foi adotada a situação mais desfavorável de carregamento, atribuindo assim o valor de 1,0 a este parâmetro. A determinação do parâmetro C_2 , que traduz o efeito da posição de aplicação de cargas, também foi uniformizada para qualquer situação, tomando o valor de C_2 igual a 0,553.

Assim sendo, verifica-se que o momento resistente ronda os 20 kN.m. Além de se cumprir a segurança por uma grande margem, os resultados permitem ainda a dispensa da verificação à encurvadura lateral, visto que o momento atuante é inferior a 4% do momento crítico.

Na viga, o momento máximo atuante é de 3,16 kN.m, que coincide com o local de esforço axial máximo. A segurança ao momento fletor é verificada, sendo que a verificação à encurvadura lateral é mais uma vez dispensada.

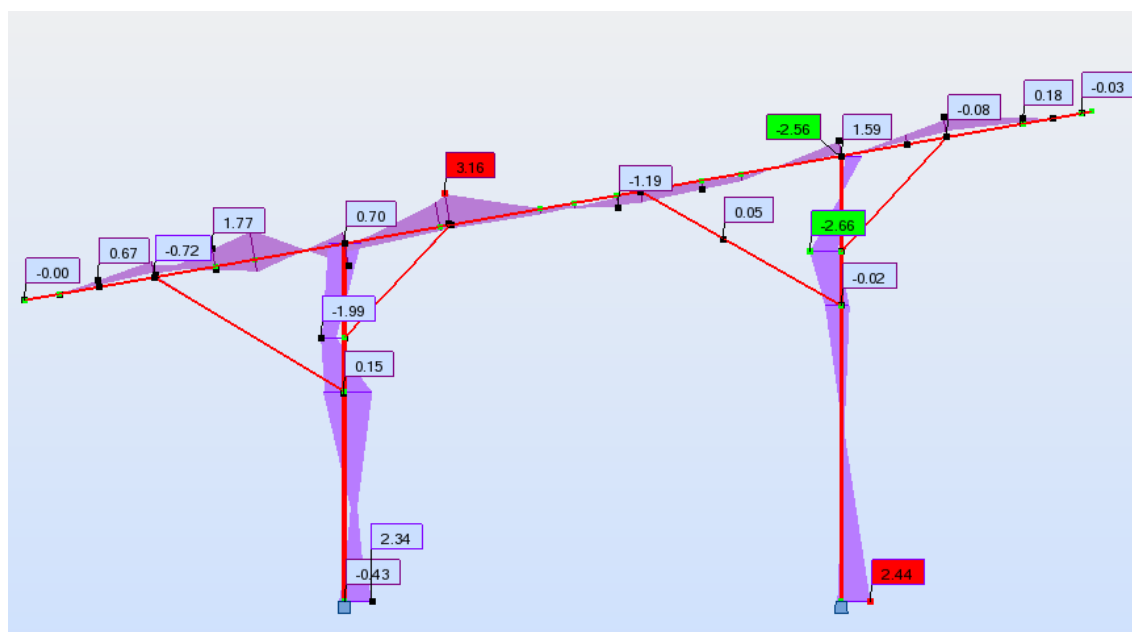


Fig.4.13 – Diagrama de momentos fletores para a envolvente das combinações em ELU (kN.m) – Pórtico Extremidade

A verificação da resistência da secção, aquando a interação de esforços, foi verificada segundo o EC3-Parte-1-3, secção 6. Mais uma vez a estrutura apresenta um bom comportamento e cumpre a segurança. Quanto ao comportamento global da estrutura, conclui-se que esta cumpre a segurança.

Para a análise do pórtico intermédio foi adotado o mesmo procedimento. Apenas diferiram os esforços a analisar. Como seria de esperar estes são superiores. O esforço axial máximo no pilar é de 24,68 kN, enquanto o da viga é de 15,87 kN. Ambas as secções apresentam resistência para verificar a segurança ao esforço axial.

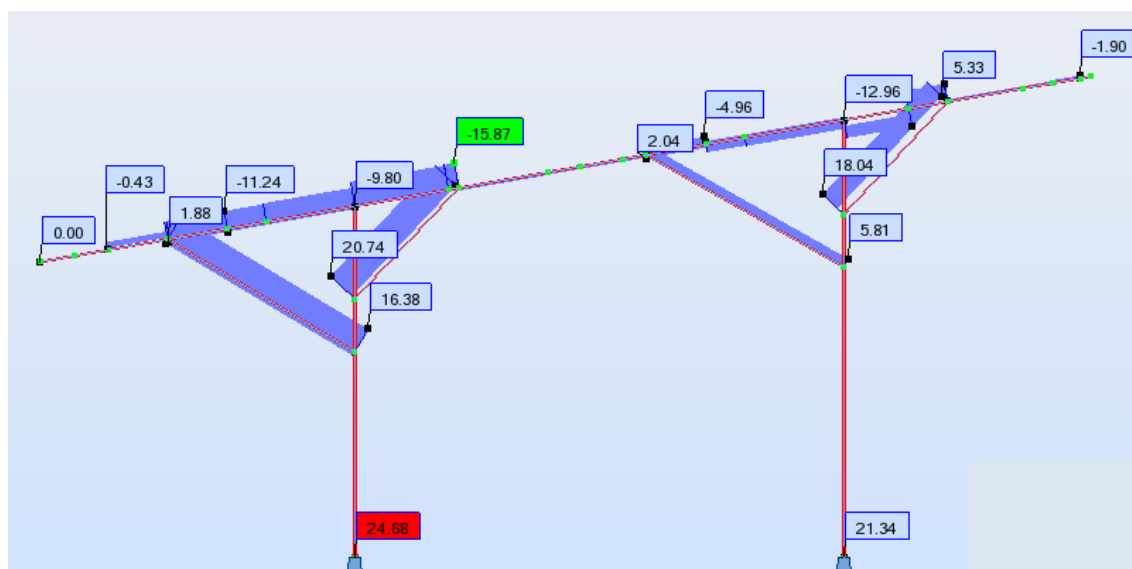


Fig.4.14 – Diagrama de esforço axial para a envolvente das combinações em ELU (kN) – Pórtico Intermédio

O momento fletor máximo no pilar é de 4,36 kN.m e o correspondente na viga é de 4,85 kN.m. Ambas as seções resistem ao momento fletor e cumprem os requisitos de segurança.

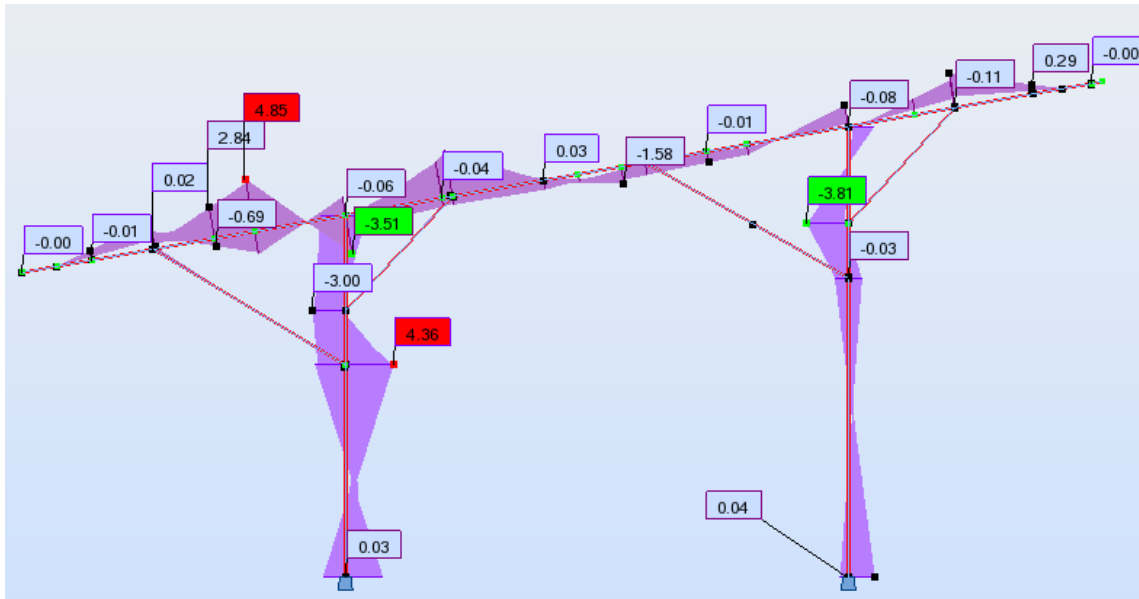


Fig.4.15 – Diagrama de momentos fletores para a envolvente das combinações em ELU (kN.m) – Pórtico Intermédio

Para a análise da interação entre esforços foi analisado o esforço axial de 24,68 kN no pilar e um momento fletor de 4,36 kN.m. Na viga os esforços preponderantes são o esforço axial de 11,24 kN.m e o momento fletor de 4,85 kN.m. Em ambas as situações se cumprem os requisitos de segurança.

Para verificação do Estado Limite de Serviço, recorre-se à combinação de esforços mais desfavorável e ao respetivo diagrama de deformações. Para coberturas em geral, o deslocamento vertical máximo admissível indicado no EC3 corresponde a:

$$\delta_{m\acute{a}x} \leq \frac{L}{200} \quad (4.34)$$

O deslocamento máximo que poderia ocorrer seria de 1,1cm. Contudo, o deslocamento máximo observado, nos pórticos, foi de 0,5 cm, como se pode observar na Fig.4.16. Conclui-se, desta forma, a satisfação da flecha máxima em ELS.

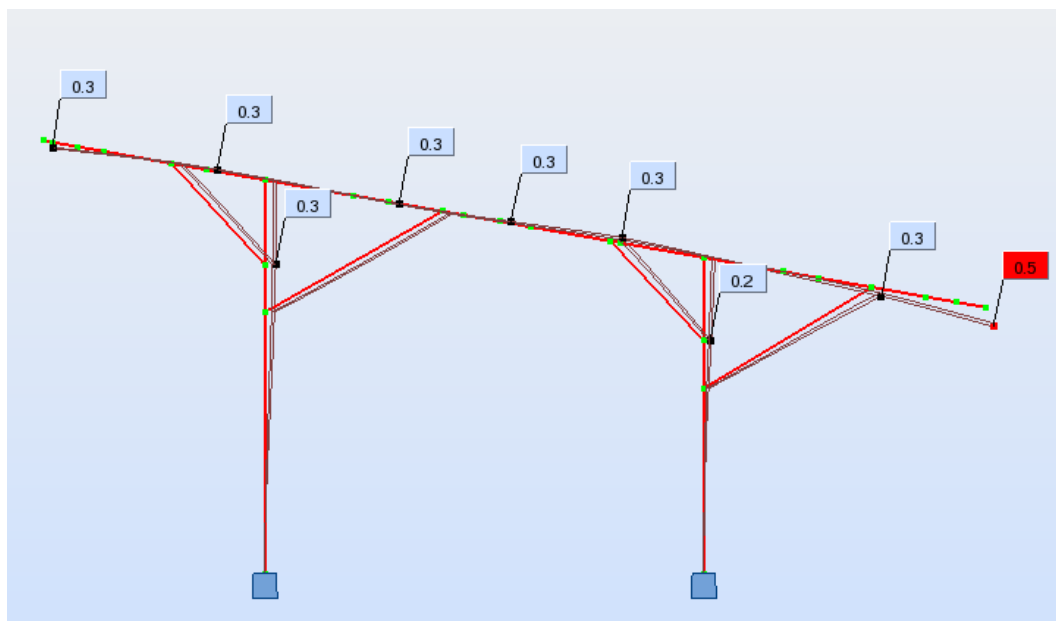


Fig.4.16 – Diagrama de deformações para a combinação mais desfavorável (cm)

Segue-se a análise da estrutura secundária, constituída por uma série de madres com secção simples na zona de momentos positivos e reforço, por sobreposição de perfis, na zona de momentos negativos. O esforço preponderante é o momento fletor, uma vez que o esforço transversal e o esforço axial são desprezáveis, face ao seu reduzido valor.

O momento máximo atuante nas madres tem o valor de 6,44 kN.m e atua numa zona de secção reforçada. No vão, com secção simples, o momento máximo corresponde a 2,72 kN.m.

O comprimento de encurvadura considerado nas duas verificações foi de 1,0m, que corresponde à distância de fixação dos painéis fotovoltaicos. A verificação da encurvadura lateral é desnecessária, visto que o momento atuante é inferior a 4% do momento crítico.

Foi verificada a segurança tanto na zona de apoio, como na zona a meio vão e na zona após a sobreposição no apoio.

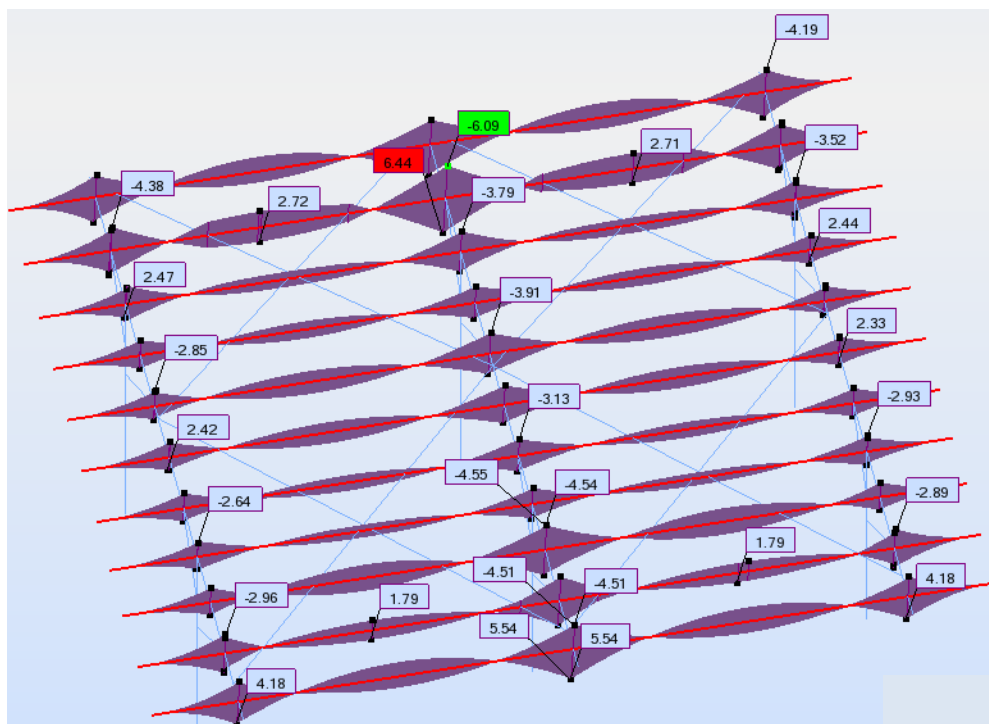


Fig.4.17 – Diagrama de momentos fletores para a envolvente das combinações em ELU (kN.m)

Como já foi referido, a flecha máxima permitida pelo EC3 é definida pela expressão 4.34. Na estrutura secundária, segundo a combinação frequente mais desfavorável, é permitida uma flecha de 2,5 cm. Tal como se verifica na Fig.4.18, a flecha máxima registada foi de 0,9cm.

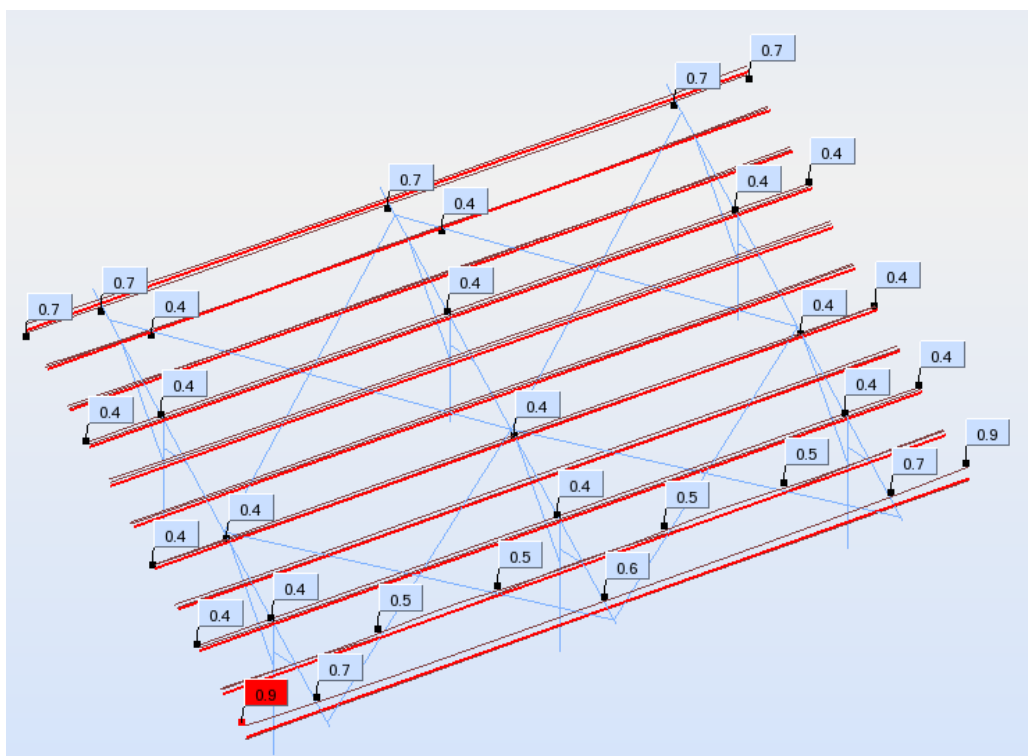


Fig.4.18 – Diagrama de deformações para a combinação mais desfavorável (cm)

As verificações são realizadas apenas para o eixo forte do perfil, uma vez que no eixo fraco, para além das ações serem menores, a própria geometria do elemento minimiza a situação, tal como a existência de painéis fotovoltaicos que confere travamento ao perfil ômega, segundo o eixo fraco.

4.4.2. ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA (MRD)

O método da resistência direta (MRD), como implementado pela norma Norte Americana [38], é um procedimento alternativo ao da norma geral [39] para determinar a resistência de perfis de aço enformados a frio. O MRD não recorre ao cálculo de larguras efetivas nem necessita de processos iterativos para o cálculo das propriedades efetivas das secções, baseia-se apenas nas tensões críticas associadas a três modos de instabilidade: modo local de placa (MLP), modo distorcional (MD) e modo global (MG).

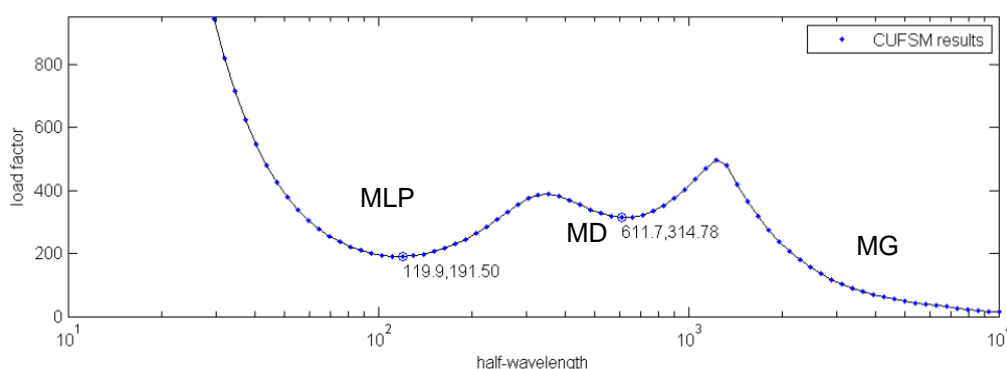


Fig.4.19 – Exemplo de aplicação do CUFSM

A aplicação do método é muito expedita, residindo a principal dificuldade na determinação das cargas críticas locais, distorcionais e globais. Para isso, recorre-se a programas computacionais, tais como o CUFSM, desenvolvido na John Hopkins University [32].

O método de resistência direta implementado na norma Norte Americana tem ainda várias limitações. O método foi desenvolvido apenas para a determinação da resistência axial (P_n) e de flexão (M_n), não tendo em consideração os efeitos do esforço transversal, colapso da alma, a existência de furações no perfil e aumento de resistência devido ao endurecimento do aço durante o processo de enformagem.

Os fenómenos de instabilidade global são caracterizados pela deformação do eixo longitudinal da barra, sendo que as secções transversais que constituem o perfil sofrem apenas deslocamentos de corpo rígido (de rotação e/ou translação). São exemplos de fenómenos de instabilidade global a instabilidade de colunas por flexão e a instabilidade de vigas-colunas por flexão-torção.

Os fenómenos de instabilidade local envolvem deformações das paredes da barra, enquanto o seu eixo longitudinal permanece na configuração indeformada. Distinguem-se ainda, entre os fenómenos de instabilidade local, a instabilidade associada apenas aos deslocamentos de flexão das paredes do perfil e aos deslocamentos de membrana, ou seja, que provocam deformações dos bordos longitudinais. Como se verá de seguida, estes modos de instabilidade correspondem ao Modo Local de Placa e ao Modo Distorcional, respetivamente.

A influência de cada tipo de fenómeno de instabilidade no comportamento estrutural de uma barra de parede fina aberta depende da sua geometria (comprimento da barra, tipo de apoio, características da

secção transversal). Além disso, uma determinada barra pode estar sujeita apenas a um ou a vários tipos de instabilidade estrutural. Deste modo uma barra poderá ser classificada como “barra curta”, quando a instabilidade ocorrer num modo local; “barra longa”, quando predominam os fenómenos de instabilidade global ou “barra intermédia” quando a instabilidade ocorre com a interação entre fenómenos locais e globais [35].

Através deste método foi possível, numa primeira abordagem, compreender o funcionamento da secção em estudo, bem como a resistência associada a esta. Desta forma, apenas como exemplo, será apresentada a análise da secção simples quando sofre flexão composta.

Para posterior comparação com o EC3, foram analisados os esforços máximos que ocorrem no pórtico intermédio, na zona de secção simples. Nesta situação ocorre um esforço de compressão de 4,96 kN e um momento fletor de 1,58 kN.m.

4.4.2.1 Cálculo da resistência de colunas

As fórmulas para a obtenção da resistência de colunas de aço enformado a frio pelo MRD são baseadas nas curvas de resistência para colunas compactas ou com secção totalmente efetiva usadas pela norma Norte Americana [39]. A aplicação dessas curvas pelo MRD é feita convertendo as tensões para força, multiplicando a tensão pela área da secção (área total da secção), considerando apenas a encurvadura global (P_{ne}), sem interação com os modos locais.

Nos códigos de dimensionamento correntes, a resistência de colunas é obtida com base no método das larguras efetivas, pelo que a resistência da coluna é dada pela multiplicação da tensão pela área da secção efetiva, considerando desde logo a perda de resistência devido aos fenómenos de instabilidade locais. No MRD a interação com os modos locais é feita num segundo passo após o cálculo de P_{ne} .

O MRD utiliza curvas de resistência específicas para o cálculo da resistência no modo local de placa (P_{nl}) e modo distorcional (P_{nd}). Estas curvas de resistência foram calibradas com base num conjunto de secções designadas por pré-qualificadas.

As curvas são apresentadas em função das esbeltezas global (λ_c), distorcional (λ_d) e local (λ_l).

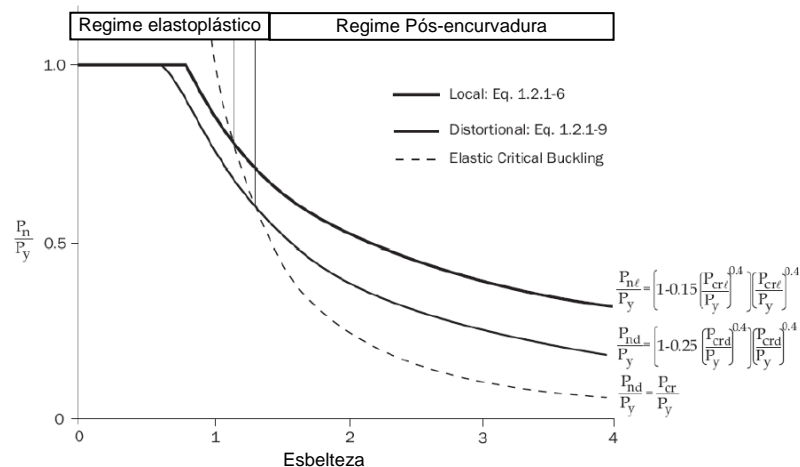


Fig.4.20 – Curvas de resistência local e distorcional para uma coluna impedida de encurvar [38]

A resistência última da coluna é, assim, a menor das resistências calculadas considerando: apenas a encurvadura global da coluna, a interação entre o modo global e o modo local de placa (P_{nl}) e a interação entre o modo global e o modo distorcional (P_{nd}).

- Resistência de colunas considerando instabilidade no modo global

O cálculo da resistência nominal de colunas, P_{ne} , considerando apenas a encurvadura nos modos globais de flexão ou flexão-torção, faz-se recorrendo às seguintes expressões:

Para $\lambda_c \leq 1,5$

$$P_{ne} = (0,658^{\lambda_c^2}) P_y \quad (4.35)$$

Para $\lambda_c > 1,5$

$$P_{ne} = \left(\frac{0,887}{\lambda_c^2} \right) P_y \quad (4.36)$$

$$\lambda_c = \sqrt{P_y / P_{cre}} \quad (4.37)$$

Onde:

- λ_c - Esbelteza global para compressão simples;
- $P_y = A \times f_y$ - Carga de cedência
- A - Área da secção
- f_y - Tensão de cedência do aço
- P_{cre} - Carga crítica na instabilidade global.

- Resistência de colunas considerando interação entre modo local e global

Cálculo da resistência nominal, P_{nl} , considerando a interação entre o modo local de placa e os modos globais:

Para $\lambda_l \leq 0,776$

$$P_{nl} = P_{ne} \quad (4.38)$$

Para $\lambda_l > 0,776$

$$P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne} \quad (4.39)$$

$$\lambda_l = \sqrt{P_{ne} / P_{crl}} \quad (4.40)$$

Onde:

- λ_l - Esbelteza local;
- P_{crl} - Carga crítica de encurvadura no modo local de placa.

- Resistência de colunas considerando instabilidade distorcional

O cálculo da resistência de colunas considerando a instabilidade no modo distorcional baseia-se em dados experimentais realizados na universidade de Sydney. Neste caso, a resistência da coluna é limitada pela carga de cedência, P_y e não P_{ne} , presumindo que o modo de colapso por instabilidade distorcional é independente do modo de colapso por instabilidade global.

Para $\lambda_d \leq 0,561$

$$P_{nd} = P_{ne} \quad (4.41)$$

Para $\lambda_d > 0,561$

$$P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne} \quad (4.42)$$

$$\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crl}} \quad (4.43)$$

Em que:

- λ_d – Esbelteza distorcional;
- P_{crl} – Carga crítica de encurvadura distorcional.

Aplicando os conceitos expostos à secção em estudo seria necessário determinar as cargas críticas de encurvadura. Para esse efeito foi utilizado o programa CUFSM [32] que, após a introdução da secção em estudo e aplicação de uma tensão de compressão uniforme de 1MPa, retornou o seguinte gráfico:

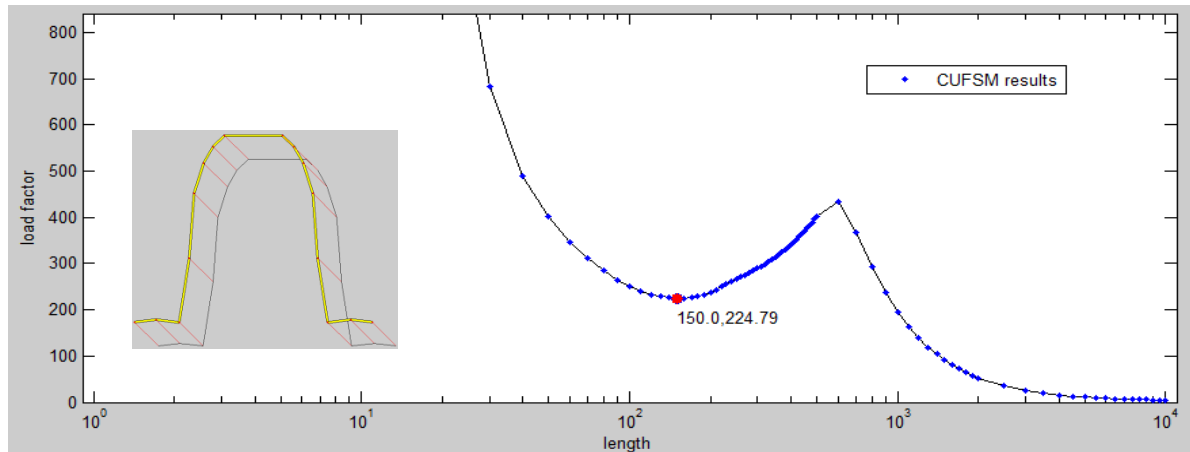


Fig.4.21 – Resultados CUFSM: Compressão

A ausência de um mínimo para o modo distorcional deve-se à elevada relação h/b . A elevada altura da alma em relação aos conjuntos banzo-reforço leva a que seja dominante o modo local, associado à flexão da alma [35].

No anexo 3, é apresentada a folha de cálculo das cargas críticas de encurvadura, tanto no modo local como global. O comprimento de encurvadura global foi considerado igual a 1,0 m, sendo este o comprimento entre a fixação das madres. Como conclusão, a resistência da secção à compressão simples é aproximadamente 95 kN.

Pelo EC3, a resistência à compressão da secção simples é de 99 kN. Os resultados obtidos são semelhantes. Contudo o MRD é mais conservativo.

4.4.2.2 Cálculo da resistência de vigas

A obtenção da resistência nominal de vigas pelo MRD, considerando apenas a encurvadura por flexão-torção, segue o mesmo procedimento usado na norma AISI [39], com a única diferença a residir no facto da resistência deixar de ser expressa em termos de tensão para passar a ser expressa em termos de momento fletor. A conversão de tensão em momento fletor é feita multiplicando a tensão pelo módulo de flexão elástico da secção transversal (fibra extrema mais comprimida), resultando nas fórmulas para o cálculo do M_{ne} .

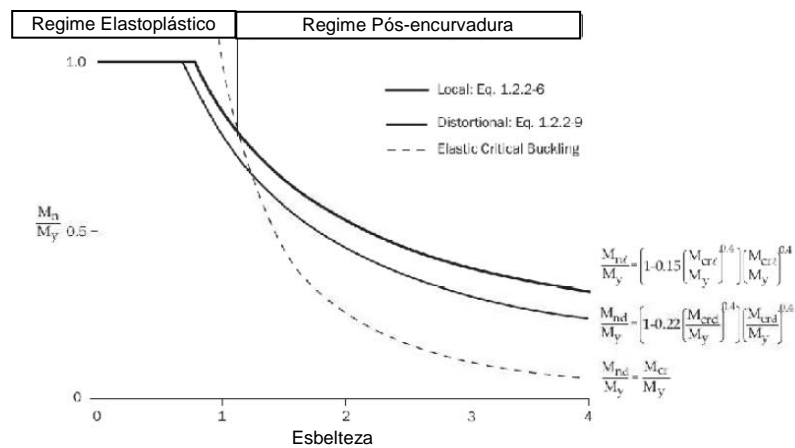


Fig.4.22 - Curvas de resistência local e distorcional para uma viga impedida de encurvar lateralmente

Tal como no caso da coluna, a resistência da viga é dada pelo mínimo das 3 resistências calculadas: resistência considerando a encurvadura por flexão-torção (instabilidade global), resistência considerando a instabilidade global e instabilidade local no MLP, resistência considerando a interação entre os fenómenos de instabilidade globais e a instabilidade no MD.

- Momento fletor nominal resistente considerando a instabilidade global

Para $M_{cre} < 0,56M_y$

$$M_{ne} = M_{cre} \quad (4.44)$$

Para $2,78M_y \geq M_{cre} \geq 0,56M_y$

$$M_{ne} = \frac{10}{9} M_y \left(1 - \frac{10M_y}{36M_{cre}} \right) \quad (4.45)$$

Para $M_{cre} > 2,78M_y$

$$M_{ne} = M_y \quad (4.46)$$

Em que:

- $M_y = W_e f_y$ - Momento fletor de cedência.

- W_e - Módulo de flexão elástico em torno do eixo relevante;
- f_y - Tensão de cedência do material;
- M_{cre} - Momento fletor elástico de encurvadura lateral com torção.

- Momento fletor nominal resistente considerando interação entre os modos local de placa e o modo global

Para $\lambda_l \leq 0,776$

$$M_{nl} = M_{ne} \quad (4.47)$$

Para $\lambda_l > 0,776$

$$M_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} M_{ne} \quad (4.48)$$

$$\lambda_l = \sqrt{M_{ne}/M_{crl}} \quad (4.49)$$

Onde:

- λ_l – Esbelteza local na flexão;
- M_{crl} – Momento fletor crítico elástico no modo local.

- Momento fletor nominal resistente considerando a instabilidade no modo distorcional

As expressões para o cálculo de M_{nd} foram propostas e calibradas por Schafer e Peköz (1999), com base no trabalho experimental de investigadores da Universidade de Sidney. O momento resistente é limitado por M_y e não M_{ne} pelo que o modo de colapso por encurvadura no modo distorcional se pressupõe independente do modo de colapso global.

Para $\lambda_d \leq 0,673$

$$M_{nd} = M_y \quad (4.50)$$

Para $\lambda_d > 0,673$

$$M_{nd} = \left[1 - 0,22 \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0,5} M_y \quad (4.51)$$

$$\lambda_d = \sqrt{M_y/M_{crl}} \quad (4.52)$$

Onde:

- λ_d – Esbelteza distorcional;
- M_{crl} – Momento fletor crítico elástico de encurvadura distorcional.

Os resultados da análise da secção sujeita a um momento fletor em torno do eixo de maior inércia da secção são mostrados na Fig.4.23.

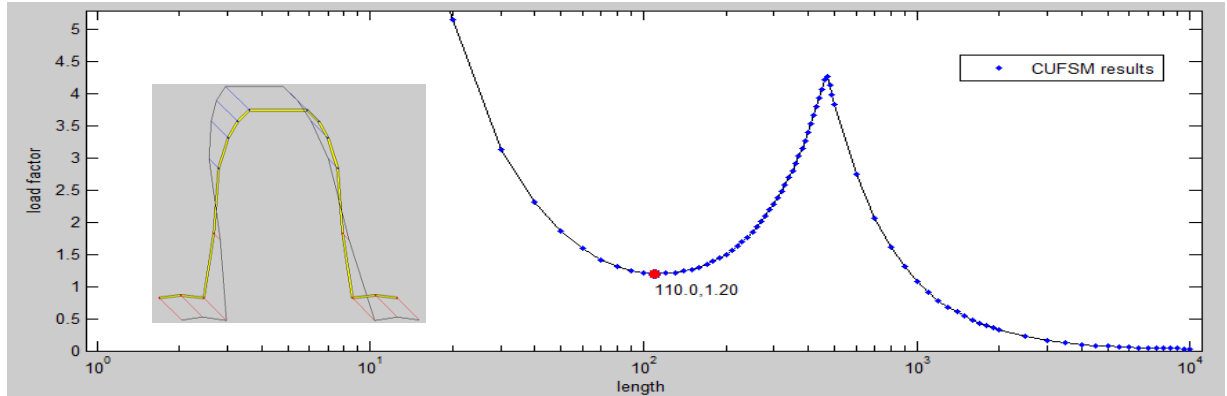


Fig.4.23 - Resultados CUFSM: Flexão sobre o eixo de maior inércia

O modo distorcional está ausente devido à razão apresentada anteriormente. O modo de encurvadura condicionante foi o local, como se comprova no anexo 3.

Pelos resultados obtidos, a resistência da secção à flexão simples sobre o eixo de maior inercia é de 6,10kN.m. Pelo EC3, a resistência da secção é de 6,03 kN.m. Mais uma vez os resultados são semelhantes e o MRD é mais conservativo.

4.4.2.3. Cálculo da resistência viga-coluna

Como se referiu, o MRD não inclui um método próprio para o cálculo da resistência de vigas quando submetidas à flexão composta. Para isso, recorre-se às expressões de interação da norma geral, que se expõem de forma sucinta:

$$\frac{\Omega_c P}{P_n} + \frac{\Omega_b C_{mx} M_x}{M_{nx} \alpha_x} + \frac{\Omega_b C_{my} M_y}{M_{ny} \alpha_y} \leq 1 \quad (4.53)$$

$$\frac{\Omega_c P}{P_{n0}} + \frac{\Omega_b M_x}{M_{nx}} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{ny}} \leq 1 \quad (4.54)$$

Onde:

- Ω_c, Ω_b - Coeficientes de ponderação das ações para o caso da compressão e flexão, respetivamente. Tomam valores menos conservativos nos casos em que a secção se enquadra no grupo das secções pré-qualificadas.
- C_{mx}, C_{my} - “Moment Gradient Factor”, conservativamente pode tomar-se igual à unidade.
- α_x, α_y - Fatores de amplificação, dados por $\alpha = 1 - \frac{\Omega_c P}{P_E}$
- P_{n0} - Resistência nominal da coluna impedida de encurvar lateralmente ($P_{ne} = P_y$).

Como a secção não se enquadra no grupo de secções pré-qualificadas foram utilizados os coeficientes de ponderação mais conservativos, ou seja, foram tomados com o valor de 2,0 ambos os coeficientes.

Tanto no EC3, como no MRD, a segurança é verificada, sendo mais uma vez o MRD mais conservativo.

5

SISTEMA FLEXÍVEL

5.1. SISTEMA ESTRUTURAL

De forma a utilizar uma membrana tensa na cobertura do sistema estrutural a desenvolver, foi concebido um modelo com dimensões semelhantes ao sistema rígido apresentado no capítulo anterior. Além de gerar uma estrutura funcional, permite a comparação posterior com o modelo rígido.

A cobertura será constituída por uma membrana tensa, de polietileno (PES) revestida a fluoreto de polivinilideno (PDVF), da empresa Serge Ferrari. Esta será delimitada por duas fronteiras rígidas, nos lados de maior desenvolvimento, e duas flexíveis, nos lados de menor desenvolvimento. A fronteira rígida é constituída por arcos de secção tubular, enquanto os bordos flexíveis são compostos por cabos.

Os pilares, em forma de V, são ligados às extremidades dos arcos e encastrados no solo. Com esta tipologia, por cada vão, são utilizados 4 pilares. A adoção desta modelo requer um maior número de pilares. Contudo, estes evitam o uso de diagonais. A secção utilizada recai novamente na secção tubular. Além de uniformizar o material estrutural, a arquitetura e o sentido estético da estrutura são favorecidos.

A membrana será esforçada nas duas direções, obtendo uma forma anticlástica que proporciona rigidez tanto para forças descendentes como ascendentes.

Tal como se observa na Fig.5.1, a estrutura projetada é constituída por três pórticos ligados por uma membrana tensa. Através da associação de várias estruturas desta tipologia é possível conceber um parque de estacionamento adaptado às necessidades do cliente. Será apenas estudada a estrutura simples, equiparável ao modelo do *SmartPark*, com capacidade para 8 lugares de estacionamento.

O caminho das forças pode ser descrito da seguinte forma: a membrana transfere as cargas de pressão/sucção através de esforços de membrana até aos elementos de fronteira que, por sua vez, transferem as cargas aos pilares. Por último, as cargas são transferidas até as fundações.

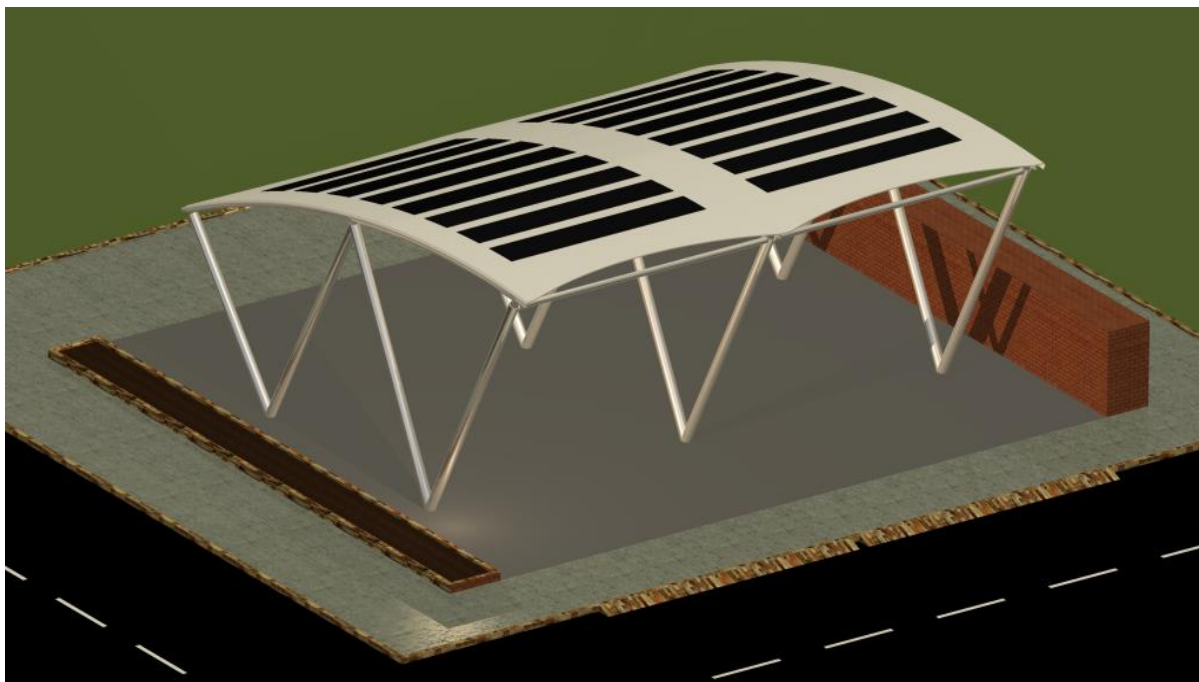


Fig.5.1 – Sistema estrutural flexível

A água da chuva que atinge a membrana flui ao longo da superfície inclinada, sendo conduzida até aos bordos da membrana, onde é expulsa. Na Fig.5.2 são ilustradas as isolinhas da membrana, que indicam a inclinação e a consequente convergência da água da chuva.

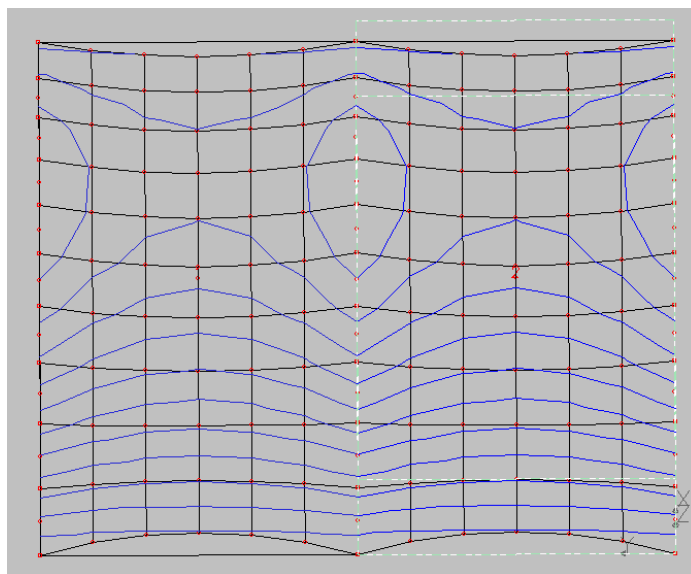


Fig.5.2 – Isolinhas após a determinação da forma

A membrana que materializa a cobertura da estrutura é do tipo Précontraint 702 Fluotop T2, adequada a estruturas permanentes e estáticas. A junção das várias telas de membrana é efetuada com soldadura após a abrasão da superfície. Na tabela 5.1 são apresentadas as características principais desta membrana.

Tabela 5.1 – Características da membrana

Peso Próprio (kN/m ²)	0.750
Espessura (mm)	0.56
Resistência à tração - Urdume (kN/m)	60
Resistência à tração - Trama (kN/m)	56
Extensão característica de rotura	<1%

O cabo, que materializa os elementos de bordo flexíveis, será do tipo Spiral Strand. Na tabela 5.2 são apresentadas as propriedades do cabo escolhido, SS16 (diâmetro 16mm). Após a análise é necessário verificar se o cabo cumpre os requisitos da estrutura.

Tabela 5.2 – Características do Cabo SS16

Cabo indeformável	Spiral Strand 16
Área (mm ²)	156
Módulo de Young (MPa)	175
Força de rotura mínima F_{puk} (kN)	254
Força admissível (45% F_{puk})	114

Para os elementos de bordo rígido e para os pilares estruturais foi escolhida a secção tubular oca, em aço S275. Na tabela 5.3 são apresentadas as características do aço utilizado.

Tabela 5.3 – Características do aço estrutural

Aço	S275
f_y (MPa)	275
f_u (MPa)	430
E (GPa)	210
ν	0,3
G (MPa)	81000

A secção inicial arbitrada corresponde a um perfil tubular oco com diâmetro exterior de 139.7mm e espessura de 10mm. As forças geradas na membrana requerem perfis robustos, de forma a reduzir os deslocamentos sofridos e a absorver as forças transmitidas para a estrutura de suporte.

5.1.1. DETERMINAÇÃO DA FORMA

As fases de geração de forma e de obtenção dos padrões de corte são estudadas através do *software* ForTen2000.

Na primeira etapa, que recai na determinação da forma, é necessário definir a condição fronteira da membrana. Como já foi referido, a membrana é delimitada por duas fronteiras rígidas e duas flexíveis. As vigas são modeladas por uma sucessão de elementos retos rígidos que se aproximam da forma do arco, e as fronteiras flexíveis são modeladas por elementos de cabo. A disposição das vigas em arco foi definida pelo processo iterativo entre a deformação da estrutura e as forças geradas na membrana após o carregamento. A solução encontrada, que se adequa à estrutura, corresponde a vigas curvas com flecha de 1,5m. Foram bloqueados os três graus de liberdade de translação nos nós de extremidade de cada cabo, de forma a simular a ligação aos pilares e assim permitir a determinação da forma. Os graus de liberdade referidos são libertados na análise estática, para estudar a estrutura como um todo, pois na realidade estes permitem translações e rotações. Na Fig.5.3 está representada a condição fronteira considerada.

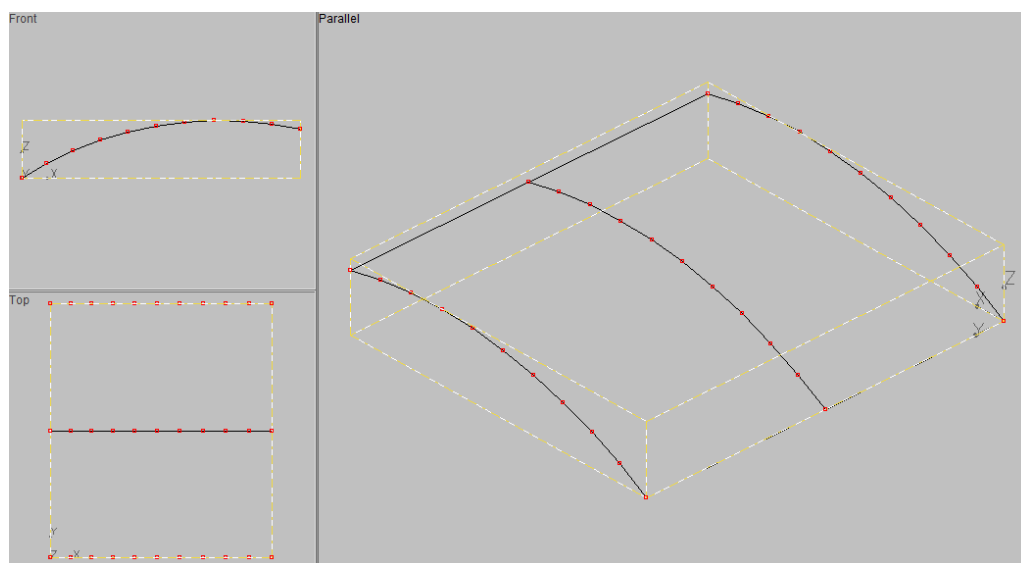


Fig.5.3 – Definição da fronteira da membrana

A malha de elementos lineares definida é espaçada de 1m nas duas direções. Outra característica necessária para a geração da malha é o fator de força C, que define a densidade de força tanto para os elementos de cabo como de membrana. Foi admitido, respetivamente, um coeficiente de 1 e 10 kN/m, para os elementos de membrana e cabo.

A densidade de força arbitrada relaciona-se com o nível de pré-esforço desejado nas estruturas de membrana. O valor máximo de pré-esforço a instalar é de 10% da tensão admissível do material. A extensão característica é também dependente das propriedades do material. Assim, a extensão e o pré-esforço podem ser determinados da seguinte forma:

- Direção Principal

$$T_r = 60 \text{ kN/m}$$

$$T_e = \frac{T_r}{S} = \frac{60}{5} = 12.0 \text{ kN/m}$$

$$T_p \approx 10\% T_e = 1.20 \text{ kN/m}$$

$$E = \frac{T_r}{\varepsilon} = \frac{60}{0.01} = 6000 \text{ kN/m}$$

- Direção Secundária

$$T_r = 56 \text{ kN/m}$$

$$T_e = \frac{T_r}{S} = \frac{56}{5} = 11,2 \text{ kN/m}$$

$$T_p \approx 10\% T_e = 1,12 \text{ kN/m}$$

$$E = \frac{T_r}{\varepsilon} = \frac{56}{0,01} = 5600 \text{ kN/m}$$

Onde:

- T_r – Resistência característica à tração do material da membrana;
- T_e – Tensão admissível;
- T_p – Valor médio do pré-esforço a instalar na membrana;
- S – Coeficiente de Segurança
- ε – Extensão característica de rotura do material.

O coeficiente de segurança S considerado está de acordo com os valores recomendados na bibliografia e vale 5.0. Após a determinação e introdução no programa dos parâmetros necessários, foi gerada a malha que se pode observar na Fig.5.4.

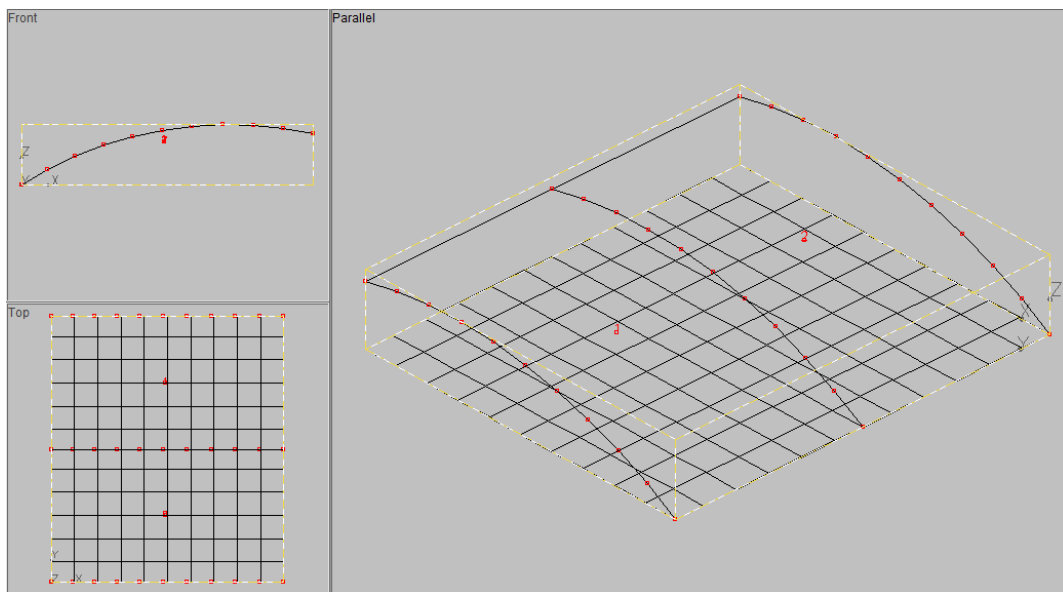


Fig.5.4 – Definição da malha quadrada

Após o processo da determinação da forma estar concluído, foi gerada a forma representada na Fig.5.5.

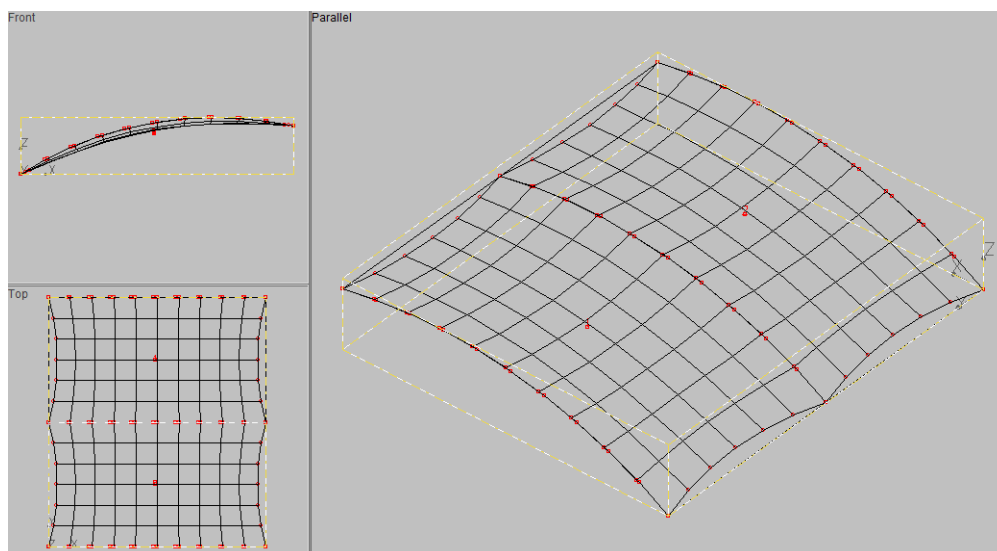


Fig.5.5 – Determinação da forma

Verifica-se que a forma encontrada corresponde aos requisitos de densidade de força especificados para os elementos. Tanto a flecha dos cabos como a deformada da membrana estão de acordo com os objetivos da estrutura, uma vez que esta disponibiliza área suficiente para a colocação do filme fino fotovoltaico e uma inclinação favorável para a expulsão da água da chuva bem como, para o aproveitamento da energia solar.

O método utilizado na determinação da forma, o método da densidade de forças, apenas necessita dos coeficientes de densidade de força. Contudo, para analisar as tensões desenvolvidas na estrutura, é necessário definir as propriedades dos materiais constituintes.

Tendo obtido a forma ideal, são agora analisadas as tensões geradas ao longo de toda a membrana. Para esse efeito foi criada uma malha triangular, que permitiu verificar o valor médio de pré-esforço na direção principal em toda a membrana (Fig.5.6).

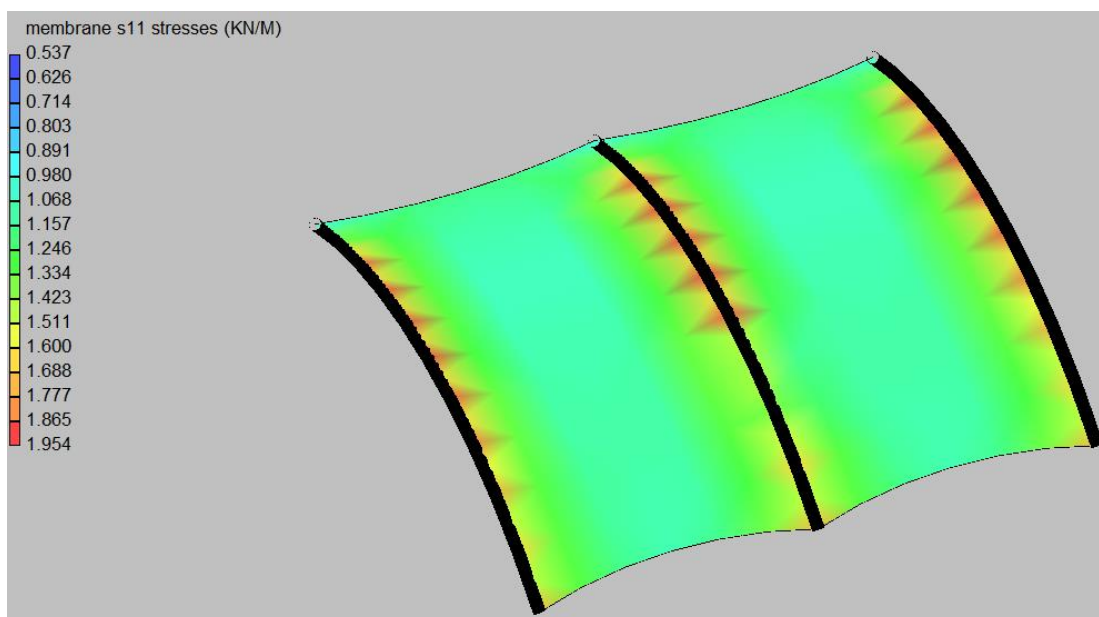


Fig.5.6 – Tensões na direção principal da membrana

O valor médio de pré-esforço, na direção principal, que domina a superfície da membrana, situa-se entre 0.980 e 1.068 kN/m. Como era de esperar, nos vértices e bordos da membrana, existe uma subida considerável do nível de pré-esforço. Contudo, tal como é habitual nestas zonas é necessário um reforço da membrana, atenuando assim esta discrepância.

Na direção secundária, o nível de tensão na membrana desenvolve-se como ilustra a Fig.5.7. O intervalo médio do valor de pré-esforço, nesta direção, é de 0.929 a 0.991 kN/m.

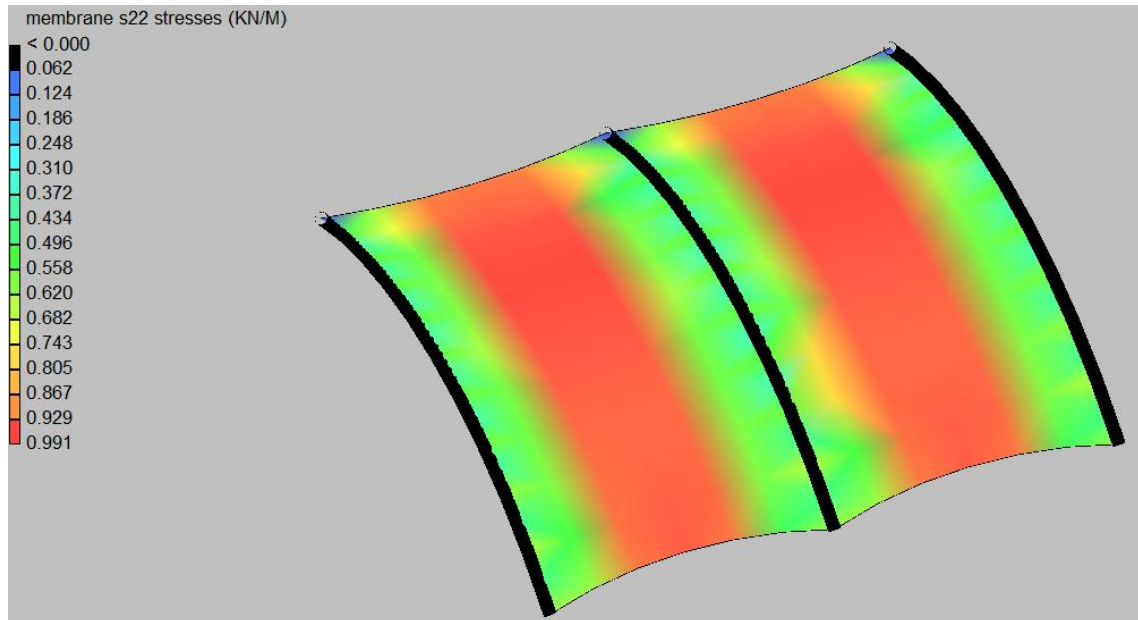


Fig.5.7 – Tensões na direção secundária da membrana

Como foi indicado, o valor médio de pré-esforço não deve ser superior, aproximadamente, a 10% da tensão admissível [24]. Em ambas as direções essa condição verifica-se.

A intensidade e direção das tensões principais na membrana estão representadas na Fig.5.8. Na direção principal as tensões são superiores, havendo um aumento progressivo na zona dos bordos.

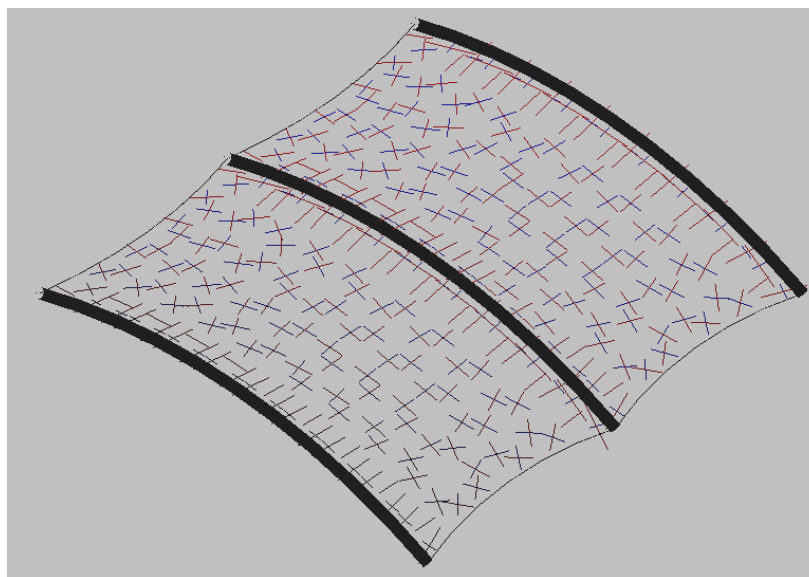


Fig.5.8 – Direção e intensidade das tensões principais

As forças de reação nos pontos considerados como fixos são representadas na Fig.5.9. Estas reações são associadas ao estado de equilíbrio inicial da membrana.

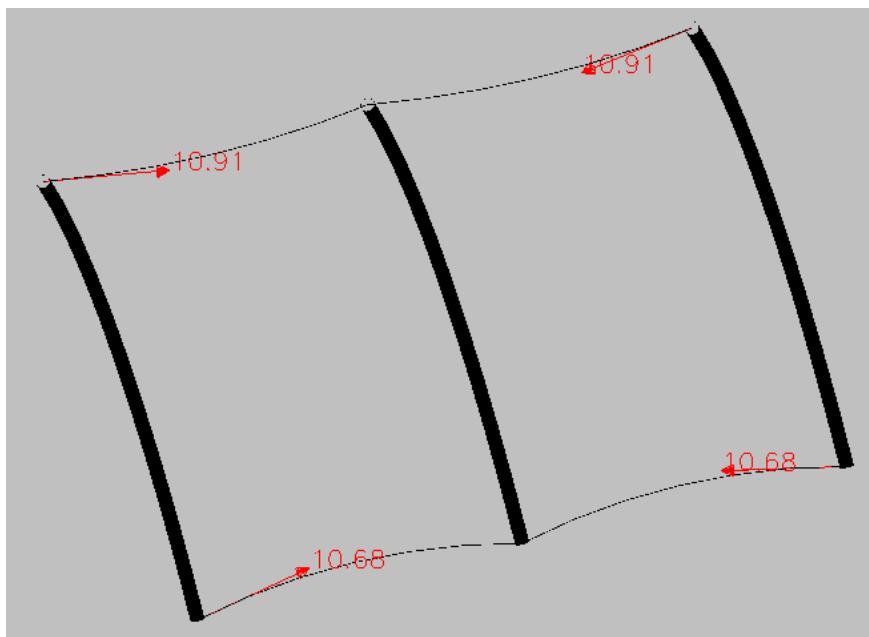


Fig.5.9 – Forças de reação (kN)

Na Fig.5.10 são ilustradas as tensões geradas na membrana, através dos elementos lineares definidos na determinação da forma. Como se verifica, esses elementos possuem uma tensão média de 0.961 e 1.099 kN/m.

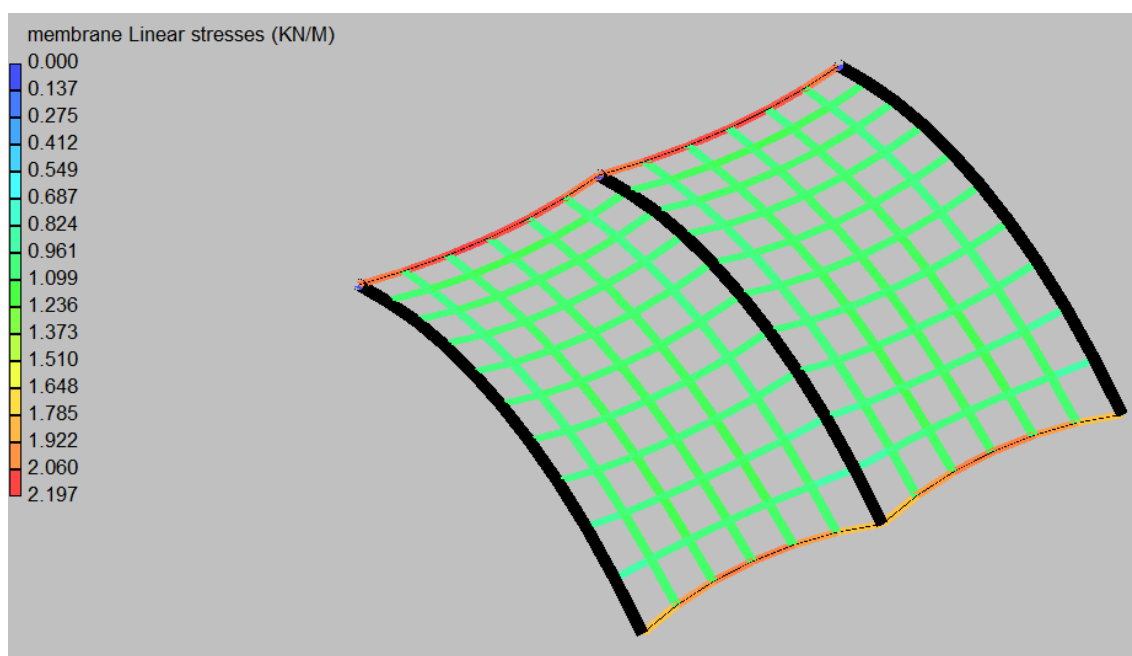


Fig.5.10 – Tensão nos elementos lineares de membrana

Os elementos de cabo assumem forças de aproximadamente 10 kN, como se verifica na Fig.5.11. Assim sendo, são validadas as respetivas densidades de força.

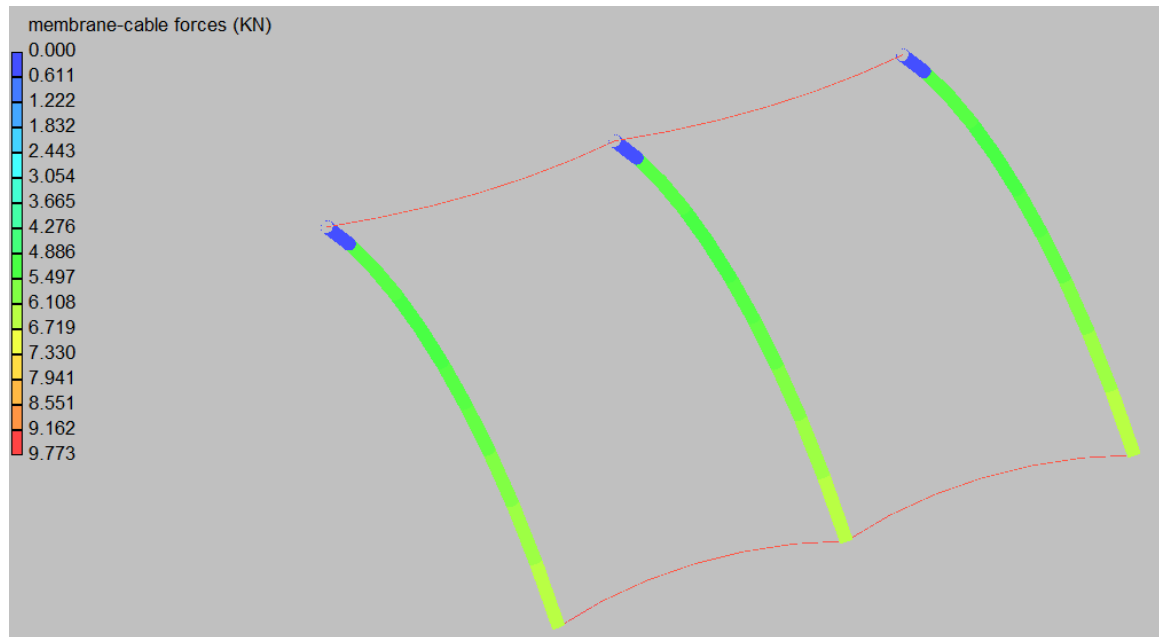


Fig.5.11 – Forças nos elementos de cabo

Terminado o processo de determinação da forma, fica assim definida a geometria inicial da estrutura G_0 em equilíbrio com o pré-esforço S_0 , sendo que estes dois parâmetros definem a rigidez e a capacidade de a membrana suportar as ações exteriores.

5.2. AÇÕES DE CÁLCULO

No que diz respeito às ações aplicadas à estrutura, foram consideradas ações semelhantes às que atuam no sistema rígido, completando com o pré-esforço. Para a aplicação das cargas distribuídas foi necessária a criação de elementos fictícios, de peso e resistência nula, que permitem a aplicação uniforme das cargas.

A ação sísmica não constitui um problema, dado o reduzido peso da membrana. No sistema rígido, conclui-se que esta ação não introduz forças significativas, o que permite desprezar a contribuição desta ação no estudo presente.

5.2.1. PESO PRÓPRIO DA ESTRUTURA E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A estrutura primária de aço foi modelada diretamente no modelo de cálculo estrutural, no qual o fator de carga gravítico foi ampliado de 1,1, para assegurar 10% de peso adicional devido aos acessórios e pintura. Estas cargas são inseridas, automaticamente, como uma carga de gravidade, tendo em conta as propriedades do material e a dimensão da secção.

O peso próprio da membrana foi considerado como uma carga de superfície distribuída ao longo dos elementos fictícios. Segundo as especificações do fabricante o valor do peso próprio corresponde a 0.750 kg/m^2 .

Os painéis de filme fino fotovoltaico adotados nesta solução possuem aproximadamente um peso próprio de $1,4 \text{ kg/m}^2$. Tanto o número de painéis fotovoltaicos, como a sua distribuição, são parâmetros desconhecidos. Adotando o lado da segurança, foi aplicada uma carga distribuída por toda a membrana correspondente ao peso próprio dos painéis.

5.2.2. PRÉ-ESFORÇO

O pré-esforço resulta do processo da determinação da forma, o que corresponde ao nível de pré-tensão ideal, no estado final de equilíbrio da estrutura. O programa ForTen2000 converte a geometria encontrada em níveis de pré-esforço nos elementos de membrana e cabo.

5.2.3. VENTO

O vento, especialmente na forma de sucção, é regularmente o caso crítico de tensão para a membrana e para os cabos, em estruturas leves de membrana. Geralmente, é considerado como um caso de carga estático, definido por uma pressão dinâmica multiplicada por um coeficiente de pressão (C_p). Supõe-se também que a membrana sofre apenas ligeiras alterações na sua geometria, de tal forma que estas possam ser ignoradas. Quando as ações do vento são elevadas, ou a estrutura é caracterizada por uma geometria complexa ou de grandes dimensões, é necessário um estudo da interação das forças do vento com a membrana.

A estrutura em estudo, além da simplicidade da sua configuração, apresenta dimensões reduzidas, o que permite a simplificação da caracterização da ação do vento, adotando os coeficientes de pressão indicados no EC1.

Devido à forma irregular da membrana, foi tomado um ângulo médio da inclinação desta. Tal como se observa na Fig.5.5 a membrana tende à posição de inclinação dos extremos das vigas. Assim sendo, o ângulo adotado foi de 10° . Devido à flexibilidade da membrana é normal tomar um valor médio de pressão por toda a sua superfície.

Tendo em consideração o EC1-Parte-1-4 e o *European Design Guide for Tensile Surface Structures*, foi considerada uma carga distribuída, perpendicular à superfície deformada, de sucção, com o valor de 1.6 kN/m^2 , e de pressão, com o valor de 1.2 kN/m^2 .

5.2.4. NEVE

A carga devida à neve é determinada pelo EC1-Parte-1-3. O valor referente a esta ação é semelhante ao anteriormente determinado para o sistema rígido, ou seja, foi considerada uma carga distribuída de gravidade no valor de 0.26 kN/m^2 .

No caso de estruturas em membrana é necessária uma verificação adicional devido ao risco do degelo e acumulação de água (*ponding*). A inclinação da membrana deve permitir o escoamento e expulsão da água, sendo necessário evitar zonas de inclinação rasa e a formação de vales.

5.3. COMBINAÇÃO DE AÇÕES

Para a verificação da deformação da membrana e a sua resistência à tração, são consideradas as seguintes combinações em Estado Limite de Serviço (SLS):

$$S_d = 1.0(S_{Gk} + P) + 1.0(S_{wk}(\text{pressão}) + S_{sk}) \quad (4.1)$$

$$S_d = 1.0(S_{Gk} + P) + 1.0S_{wk}(\text{sucção}) \quad (4.2)$$

Para o dimensionamento da estrutura de suporte metálica foram consideradas as seguintes combinações em Estado Limite Último (ULS):

$$\begin{aligned} & \text{Ação Base – Neve} \\ S_d &= 1,35.S_{Gk} + P + 1,5.(S_{sk} + 0,6.S_{wk}(\text{pressão})) \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} & \text{Ação Base – Vento} \\ S_d &= 1,35.S_{Gk} + P + 1,5.(S_{wk}(\text{pressão}) + 0,5.S_{sk}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$S_d = 1,00.S_{Gk} + P + 1,5.(S_{wk}(\text{sucção})) \quad (4.5)$$

A falta de rigidez à flexão torna as estruturas de membrana suscetíveis a grandes variações geométricas mesmo com carregamentos moderados, ou seja, tais estruturas adaptam-se aos carregamentos, sofrendo por vezes deformações importantes. Torna-se necessário proceder a uma análise não-linear para incluir estes efeitos no estudo da resposta aos carregamentos. Todas as combinações são estudadas tendo por base uma análise não linear geométrica.

5.4. ANÁLISE ESTRUTURAL

Na fase de geração da forma, os apoios da membrana conferidos pelos pilares devem estar impedidos de se deslocar. Como tal, os pilares apenas são representados na fase de análise global da estrutura. Nesta etapa, os graus de liberdade anteriormente bloqueados são libertados, para que a estrutura se comporte como uma só.

Na modelação da estrutura recorrendo ao programa de cálculo SAP2000 utilizaram-se as coordenadas obtidas pelo programa ForTen2000, na fase de geração da forma.

A análise da estrutura será efetuada com base num modelo de cálculo 3D constituído por elementos de barra, que simulam os pilares e as vigas em arco, e elementos de cabo, que simulam a membrana e os cabos de bordo.

De forma a simular a membrana por elementos de cabo, foi necessário dotar cada elemento com secção equivalente à largura da membrana na área de influência de cada cabo.

No programa de cálculo ForTen2000 não é necessário definir a secção transversal dos elementos de membrana. Contudo, a secção a importar para o programa SAP2000, de forma a simular elementos lineares de membrana, corresponde à largura calculada pela metodologia a seguir indicada.

Após o processo de determinação da forma obtêm-se as tensões finais de superfície e os comprimentos característicos de cada elemento, tal como se observa na Fig.5.12.

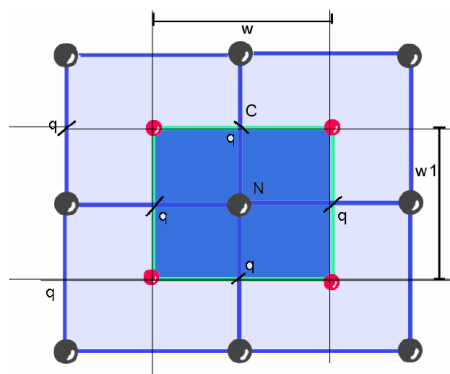


Fig.5.12 – Esquema de cálculo da largura dos elementos de membrana

Os nós representados a vermelho são calculados pela intersecção das linhas que passam pelos pontos intermédios do cabo q . A largura assim definida, w , é atribuída ao cabo C como a sua secção transversal.

A tensão nos elementos lineares de membrana é calculada da seguinte forma:

$$S = \frac{F}{w} \quad (4.6)$$

Em que:

- S – valor de tensão (kN/m);
- F – força de cabo (kN);
- w – largura da secção transversal do cabo (m).

O programa ForTen2000 fornece os dados relativos à área equivalente e ao pré-esforço de cada elemento de cabo. Consequentemente, foram introduzidos os dados quanto às propriedades de cada elemento e a condição inicial de pré-esforço.

Após um processo de ajuste de geometria, controlando a flecha das vigas e a força inicial de pré-esforço, de forma a otimizar o funcionamento da estrutura, resultou a configuração apresentada na Fig.5.13. Foi necessário colocar elementos de contraventamento para reduzir a deformação da estrutura e compatibilizar as forças de pré-esforço inicial definidas na etapa de determinação da forma.

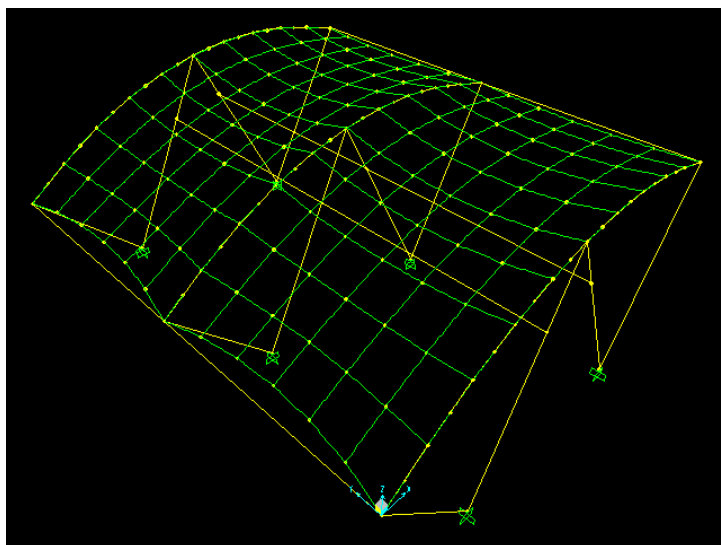


Fig.5.13 – Modelo de cálculo da estrutura flexível, SAP2000

Os elementos de contraventamento e a estrutura metálica de suporte estão representados na Fig.5.14. Tal como se observa os elementos de contraventamento ligam os pórticos entre si nas extremidades e a meio vão das vigas, através de 4 barras metálicas com secção tubular idêntica à da estrutura de suporte.

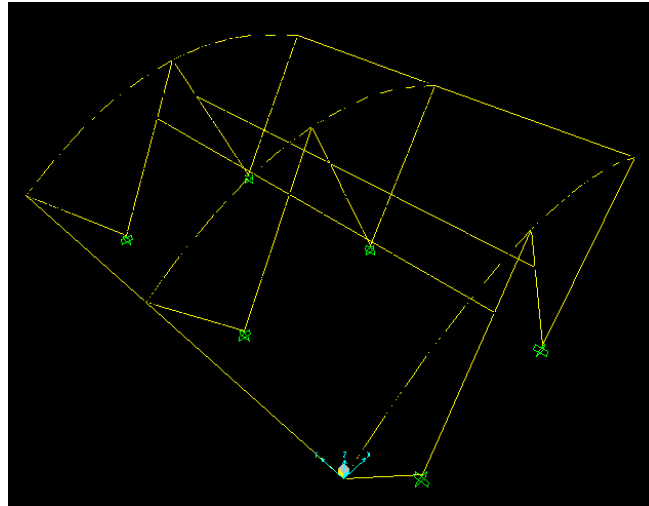


Fig.5.14 – Estrutura metálica de suporte

Os resultados derivados da análise da estrutura pelo programa SAP2000 são disponibilizados como forças. Contudo, como a malha de elementos finitos é aproximadamente de 1.0×1.0 m, definida anteriormente na fase de determinação de forma, as forças são de valor semelhante às tensões geradas na membrana.

De forma a conhecer as tensões concretas geradas na membrana, foram divididas as forças resultantes em cada cabo pela área correspondente. São apresentados os diagramas das forças como *layout* dos resultados mas serão comentadas as tensões.

Após a introdução do pré-esforço e o peso próprio da estrutura foram obtidos os resultados da Fig.5.15. Tal como era pretendido, a tensão média na direção principal da membrana ronda 1.0 kN/m e na direção secundária 0.9 kN/m . A força nos cabos de bordo é aproximadamente de 10 kN . Assim sendo, os requisitos iniciais quanto ao pré-esforço instalado são respeitados.

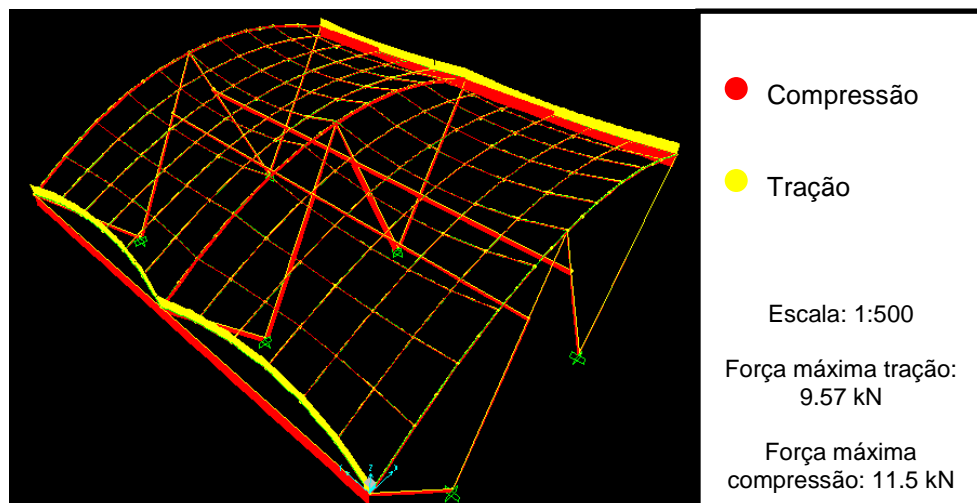


Fig.5.15 – Forças na membrana – Pré-esforço e peso próprio (kN)

Relativamente às deformações sofridas, a membrana não apresenta deslocamentos excessivos, sendo que o máximo registado é de 1,0cm na direção horizontal.

Passando à análise das restantes cargas, verificou-se que o caso de carga crítica corresponde à ação do vento ascendente. As forças geradas nos elementos lineares de membrana estão representadas na Fig.5.16.

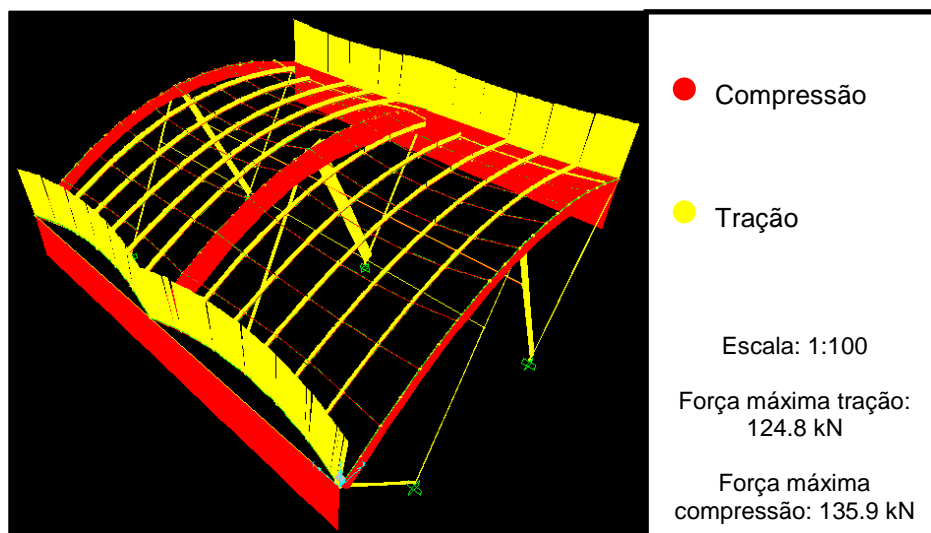


Fig.5.16 – Forças na membrana – Vento ascendente (kN)

A tensão média na direção principal da membrana é de 11.3kN/m, enquanto na direção secundária é de 3.7kN/m. Para este caso de carga é possível observar que a tensão máxima instalada atinge o valor de 15.3kN/m. No entanto, este valor ocorre junto dos bordos rígidos da membrana podendo o problema ser resolvido executando um reforço local com uma dupla camada de material. Em ambas as direções são respeitados os valores de tensão admissível estipulada.

Os deslocamentos (Fig.5.17) sofridos nesta combinação não são excessivos, sendo que o deslocamento máximo observado ocorre na zona de meio vão onde tem o valor de 29 cm na direção vertical ascendente.

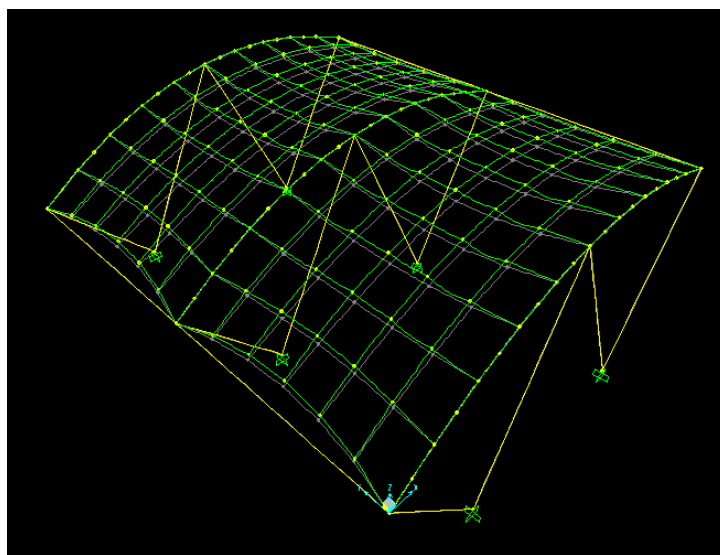


Fig.5.17 – Deformação – Vento ascendente

No que diz respeito ao caso de carga correspondente à ação conjunta da neve e vento descendente, os resultados obtidos em termos de forças são os representados na Fig.5.18.

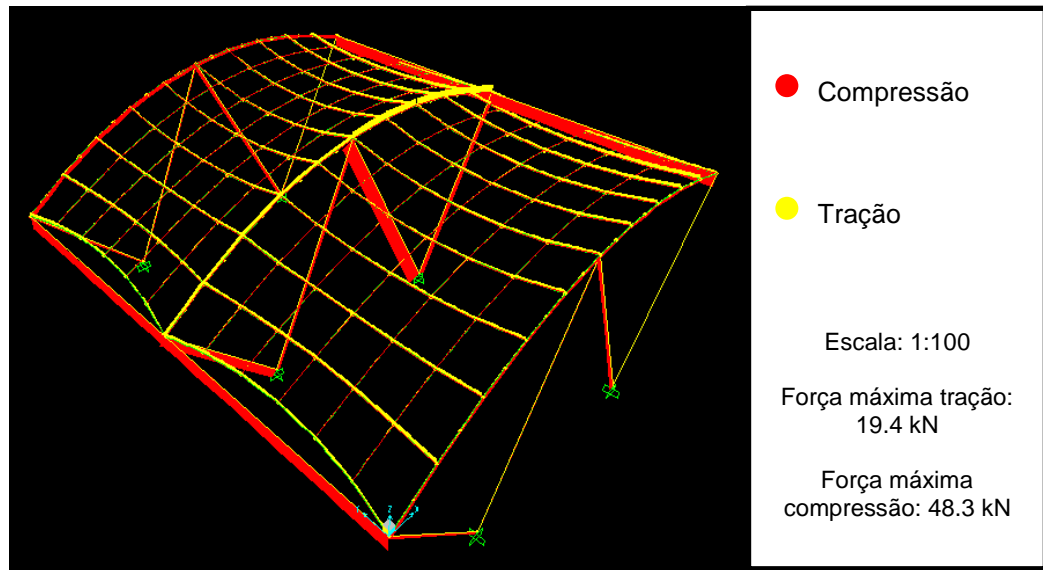


Fig.5.18 – Forças na membrana – Neve e vento descendente (kN)

Tanto na direção principal, como na secundária, a membrana não apresenta tensões relevantes, sendo que na direção principal atua uma tensão média de 9.4kN/m e na direção secundária 2.3kN/m.

Os deslocamentos sofridos nesta combinação são ilustrados na Fig.5.19. Tal como se observa, o deslocamento máximo ocorre a meio vão da membrana e atinge aproximadamente 11 cm na direção vertical descendente.

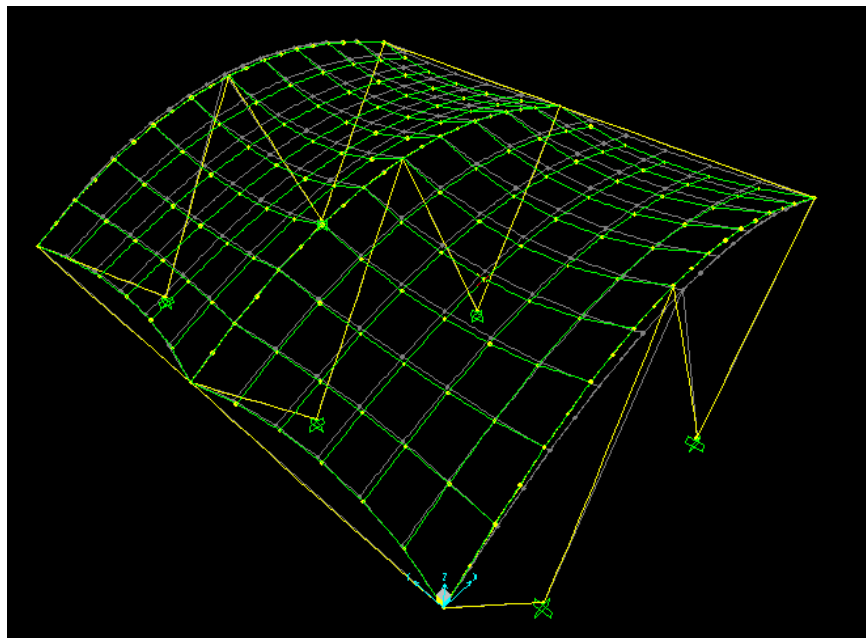


Fig.5.19 – Deformação – Neve e vento descendente

Relativamente às forças desenvolvidas nos cabos, verifica-se que a combinação preponderante corresponde a ação do vento ascendente. Estes são solicitados por trações significativas na ordem dos 125kN. Portanto, a força admissível dos cabos é respeitada na verificação das combinações em estado limite de serviço.

Conclui-se assim que a membrana e o cabo considerado são adequados à estrutura projetada. As tensões admissíveis da membrana são respeitadas para todas as combinações de serviço. Além disso, a membrana nunca sofre compressões, evitando assim problemas de enrugamento e possíveis fenómenos de *ponding*. O cabo cumpre os requisitos de segurança e garante um bom esticamento da membrana.

A estrutura de suporte foi verificada tendo em conta as combinações em Estado Limite Último. Segundo o EC3, a secção tubular utilizada é de classe 3, visto que:

$$\frac{d}{t} = \frac{139.7}{10.0} = 13.97 \leq 90 \times 0.92^2 = 16.56$$

Portanto, pode-se atingir a resistência elástica (tensão de cedência na fibra mais solicitada), mas não se consegue atingir a resistência plástica devido à possível ocorrência de fenómenos de instabilidade local. O fator de imperfeição correspondente a perfis tubulares é de 0.13, referente à curva de encurvadura “a” [40].

No anexo 4 são apresentados os cálculos efetuados para a verificação da estrutura de suporte. Como se verifica toda a estrutura cumpre a segurança em relação ao Estado Limite Último.

Os elementos mais esforçados correspondem aos elementos de contraventamento, que chegam a suportar esforços axiais de 200kN, na combinação de ação base vento ascendente. Tal como se observa na Fig.5.20 estes elementos são indispensáveis, visto que são os responsáveis pela estabilidade de toda a estrutura e asseguram o esticamento da membrana.

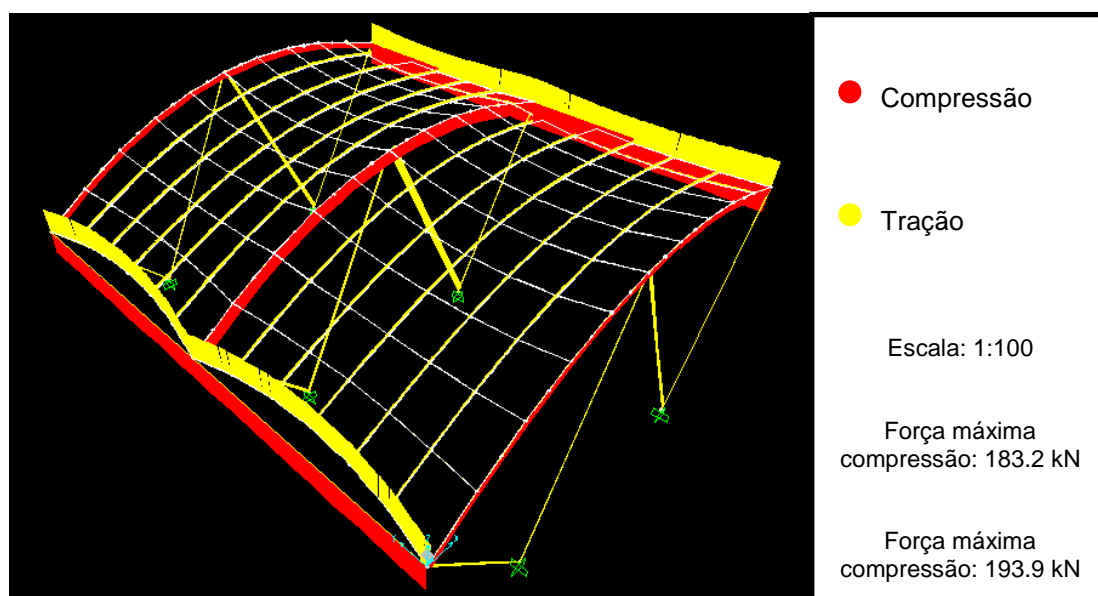


Fig.5.20 – Esforço axial – Vento ascendente

As deformações sofridas pela estrutura de suporte foram controladas tendo em conta as disposições do EC3. O deslocamento máximo observado ocorre nas vigas de extremidade na direção horizontal, para

a combinação de ação neve e vento descendente, com um valor de 2.5 cm. Contudo, a estrutura cumpre os limites de deslocamento máximo uma vez que seria permitido um deslocamento de 2.7 cm.

De forma a otimizar a estrutura e diminuir os custos associados a esta, foram testadas outras possibilidades. Contudo, os resultados obtidos não foram ao encontro do objetivo proposto.

Em primeiro lugar foi testada a hipótese de a estrutura não necessitar de contraventamento, mas foram obtidos deslocamentos irreais para o funcionamento desta. Na Fig.5.21 é ilustrada a deformada da estrutura apenas quando introduzido o pré-esforço e peso próprio.

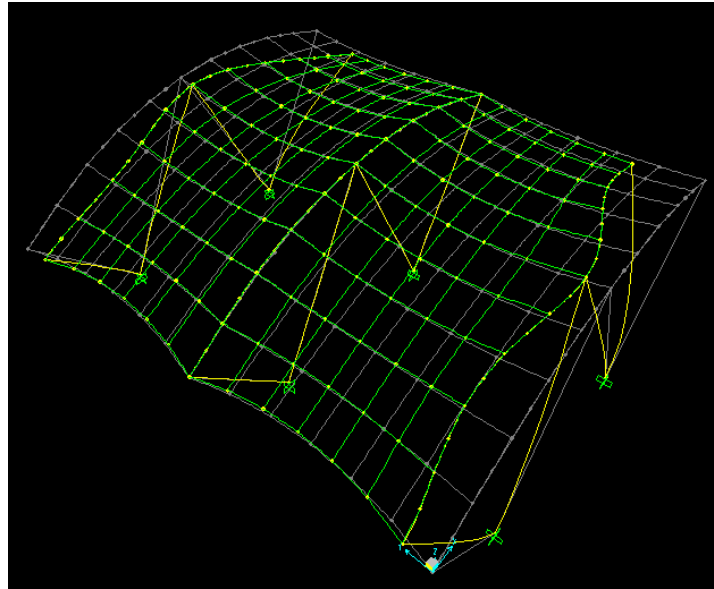


Fig.5.21 – Deformada estrutura sem contraventamento (escala 1:1)

Outra das alternativas testadas foi a utilização de uma secção com perfil tubular oco com 100mm de diâmetro exterior e uma espessura de 7mm. Apesar de a membrana cumprir os requisitos de segurança, a estrutura de suporte em aço apresentava deslocamentos superiores aos aceitáveis.

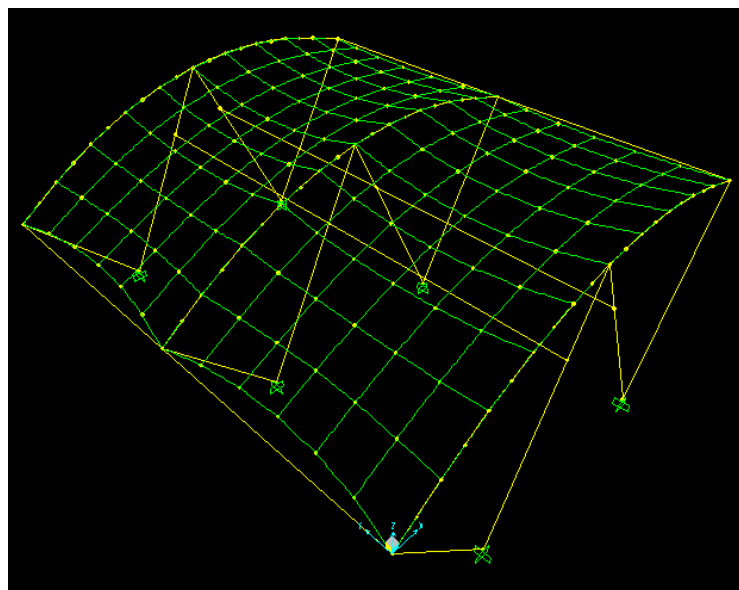


Fig.5.22 – Estrutura com secção tubular de 100mm

5.5. PADRÕES DE CORTE

A análise da estrutura, através do programa SAP, é verificada e validada, cabendo agora ao programa FORTEN a tarefa de converter a estrutura tridimensional num conjunto de peças planas.

A fase de definição dos padrões de corte requer alguns critérios, desde óticos a construtivos e topológicos. Quando planificados, os padrões de corte devem apresentar lados aproximadamente retos, evitando o desperdício de material durante a fabricação e facilitando a soldagem das faixas. Com o intuito de se obter padrões de corte regulares, são criadas linhas de corte geodésicas sobre as superfícies de membrana.

A largura das faixas de corte foi considerada igual à largura máxima com que a membrana é fabricada, ou seja, foi adotado o valor de 1,78m para a largura máxima dos padrões de corte. Outro fator a ter em conta é o direcionamento dos padrões de corte, sendo que estes devem ser fabricados na direção de maior intensidade de tensão.

Assim sendo, com o auxílio do programa FORTEN procedeu-se à planificação dos padrões de corte, segundo a Fig.5.23.

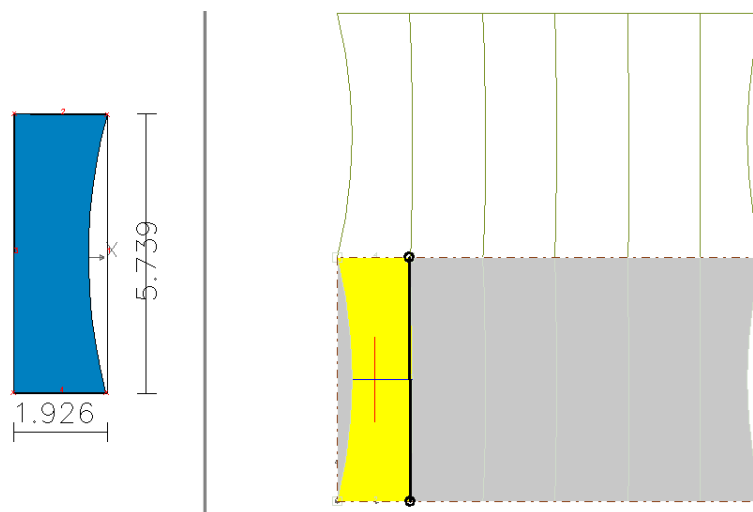


Fig.5.23 – Realização dos padrões de corte

Ainda nesta fase é definida a compensação para cada direção. Para a estrutura presente, opta-se por valores de compensação de 2 e 1%, nas direções x e y, respetivamente, tendo em conta a anisotropia do material.

Os padrões de corte resultantes são ilustrados na Fig.5.24, onde é possível identificar as peças individuais da estrutura. Esta pormenorização torna-se uma ferramenta útil na preparação e organização de todo o processo construtivo, como, por exemplo, no empacotamento e preparação para içamento da estrutura.

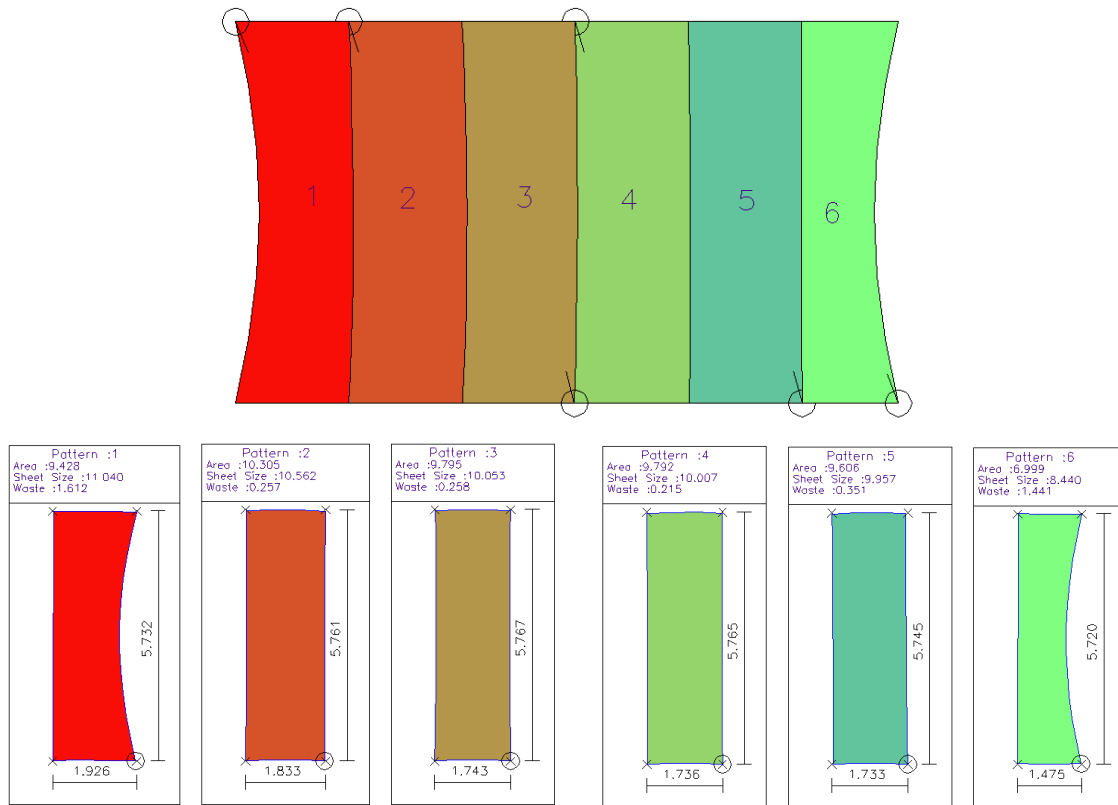


Fig.5.24 – Padrões de corte

Na Fig.5.25 é apresentada a interação dos padrões de corte de modo a formar a cobertura do parque de estacionamento. As estruturas de membrana acarretam um valor estético significativo, sendo assim necessário rigor e cuidado na emenda dos diferentes padrões de corte.

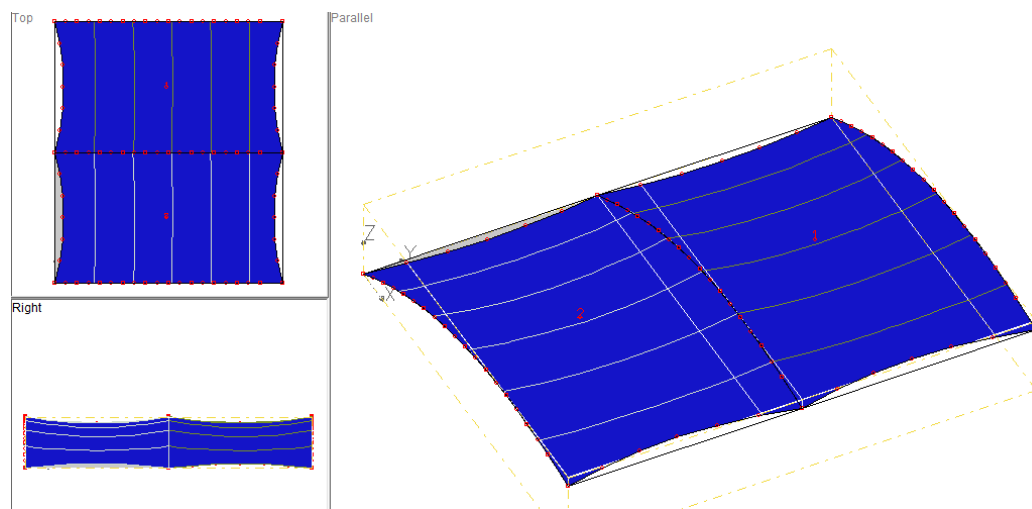


Fig.5.25 – Padrões de corte – Estrutura

6

ESTUDO ECONÓMICO DE UM SISTEMA DE APROVEITAMENTO FOTOVOLTAICO

6.1. SISTEMA DE APROVEITAMENTO FOTOVOLTAICO

Hoje em dia, os sistemas de aproveitamento fotovoltaicos são usados num vasto conjunto de aplicações, das quais se destacam [41]:

- Aplicações de média potência (dezenas ou centenas de quilowatt), de que são exemplo:
 - Eletrificação rural: abastecimento doméstico em locais remotos sem rede, bombagem de água e irrigação, complemento de abastecimento de locais remotos com ou sem rede;
 - Produção descentralizada ligada à rede, ou seja, pequena fonte de geração que não faz parte de uma grande central de produção e está localizada perto do local de consumo.
- Aplicações de pequena potência (décimas ou unidades de quilowatt), cujas utilizações podem ser as seguintes:
 - Relógios e calculadoras;
 - Acessórios de veículos automóveis, por exemplo, alimentação de ventoinhas para refrigeração de automóveis estacionados, ou carregamento de baterias em veículos de campismo;
 - Sinais rodoviários (móveis e estáticos) e parquímetros;
 - Telefones de emergência, transmissores de televisões e de telemóvel;
 - Frigoríficos médicos em locais remotos.

Em muitas destas aplicações, os sistemas fotovoltaicos substituem, com vantagem, outros meios de produção alternativos, designadamente nas aplicações de pequena potência, onde a sua difusão é muito significativa.

Os sistemas fotovoltaicos, sozinhos ou em associação com outras fontes de energia renováveis, são competitivos para alimentação de certos locais remotos, onde as soluções alternativas convencionais, baseadas em gerador diesel ou rede elétrica, são claramente inferiores do ponto de vista económico e apresentam inconvenientes ambientais não negligenciáveis.

Já no modo de funcionamento de produção descentralizada ligada à rede de energia elétrica, a situação é completamente diferente: os sistemas fotovoltaicos estão ainda longe de ser competitivos, quer com

as fontes de produção convencionais, quer principalmente com outras energias renováveis. O elevado investimento e a baixa utilização anual da potência instalada são as principais razões para a reduzida quantidade de sistemas ligados à rede.

Em aplicações de média potência, os painéis fotovoltaicos podem ser operados principalmente em duas formas:

- Ligados à rede de energia elétrica, à qual entregam toda a energia que a radiação solar lhes permite produzir; para este efeito, é necessário um inversor, que serve de elemento de interface entre o painel e a rede, de modo a adequar as formas de onda das grandezas elétricas DC (corrente contínua) do painel às formas de onda AC (corrente alternada) exigidas pela rede.
- Em sistema isolado, alimentando diretamente cargas. Neste modo de funcionamento, o critério de dimensionamento é a radiação disponível no mês com menos sol, uma vez que é necessário assegurar o abastecimento durante todo o ano; em associação com os coletores fotovoltaicos, é ainda necessário dispor de:
 - Baterias, de modo a assegurar o abastecimento nos períodos em que o recurso é insuficiente ou não está disponível. As baterias são carregadas quando o recurso disponível permite obter uma potência superior à potência de carga.
 - Regulador de carga, que efetua a gestão da carga por forma a obter perfis compatíveis com a radiação disponível e com a capacidade das baterias.
 - Inversor, requerido se houver cargas alimentadas em AC.

O objetivo primário das soluções em estudo consiste no desenvolvimento de uma aplicação de média potência ligada à rede. Contudo, no desenvolvimento do estudo fotovoltaico, será especificado o tipo de aplicação, e os componentes adicionais necessários a esta, conforme os resultados obtidos.

A potência máxima que uma célula fotovoltaica, de tamanho comum, é capaz de debitar é insuficiente para as mais variadas aplicações, pelo que estas são conectadas em série ou em paralelo formando um módulo fotovoltaico.

Um modelo, simplificado, que permite obter uma estimativa da energia anual produzida, desenvolve-se desprezando a influência da temperatura e considerando que o valor médio da potência máxima anual é diretamente proporcional à radiação média incidente anual.

Assim sendo, em termos anuais, a potência máxima atingida determina-se da seguinte forma:

$$P_{\max} = \frac{G_{\text{med}}}{G^r} P_{\max}^r \quad (6.1)$$

E, portanto, a energia produzida anualmente, E_a , obtém-se por:

$$E_a = \eta_{\text{inv}} 8760 P_{\max} \quad (6.2)$$

$$E_a = \eta_{\text{inv}} 8760 G_{\text{med}} \eta^r A \quad (6.3)$$

Em que:

- G_{med} – radiação incidente média anual;
- G^r – radiação incidente, condições de referência STC;
- P_{\max}^r – potência máxima, condições de referência STC;
- η_{inv} – rendimento do inversor;

- η^r – rendimento, condições de referência STC;
- A - área do módulo.

As condições nominais de teste (STC), normalizadas para a realização das medidas dos parâmetros característicos da célula, designadas condições de referência, são:

- Temperatura, $\theta^r = 25\text{ °C} \Leftrightarrow T^r = 298,16\text{ K}$
- Radiação incidente, $G^r = 1000\text{ W/m}^2$

Consequentemente, as grandezas referenciadas pelo índice superior r consideram-se medidas nas condições de referência – STC (*Standard Test Conditions*).

O valor de P_{\max}^r é característico de cada tipo de célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante. A unidade de medida é watt-pico, Wp.

O rendimento nas condições de referência é a relação entre a potência de pico e a potência da radiação incidente:

$$\eta^r = \frac{P_{\max}^r}{AG^r} \quad (6.4)$$

A radiação incidente é obtida através de medições, que são habitualmente realizadas sobre um plano horizontal; no entanto, outras medições efetuadas e estimativas realizadas para planos inclinados sugerem que a maximização da energia solar absorvida em Portugal é atingida com grandes inclinações (entre 50° e 60°) no inverno e pequenas inclinações (entre 5° e 10°) no verão. Como não é prático nem económico mudar a inclinação das superfícies coletoras consoante a estação do ano, usam-se normalmente planos com inclinação fixa.

O plano inclinado fixo que globalmente maximiza a radiação solar absorvida tem uma inclinação aproximadamente igual à latitude do local. Deve também notar-se que no hemisfério norte os painéis fotovoltaicos devem ser orientados a sul.

A orientação dos módulos fotovoltaicos tem, por isso, um papel fundamental na produção de eletricidade obtida pois a radiação adquirida depende desta.

Estudos realizados em Portugal de avaliação do potencial solar para produção de eletricidade conduziram ao mapa de isolinhas do índice de desempenho de sistemas fotovoltaicos – kWh fornecidos por ano, por Watt-pico instalado, que se reproduz na Figura 6.1.

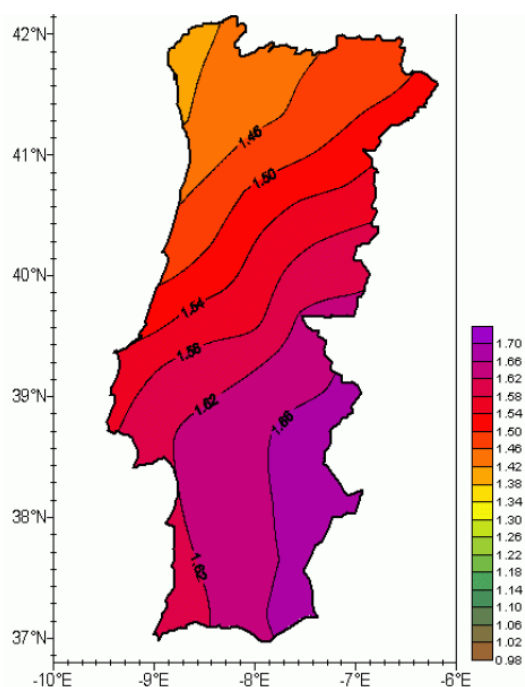


Fig.6.1 – Índice kWh/Wp em sistemas fotovoltaicos ligados à rede

O local em estudo, Oliveira de Frades, situa-se na zona entre 1.45 e 1.5 kWh/Wp. Por esta aproximação foi possível obter a radiação incidente média mensal utilizando o programa PVSyst (<http://www.pvsyst.com/en/>), que permite a análise de sistemas fotovoltaicos. Na tabela 6.1 estão representados os valores da radiação média mensal para uma inclinação dos módulos fotovoltaicos de 0, 10 e 20°.

Tabela 6.1 – Radiação média mensal (kWh/m²)

	Inclinação (°)		
	0	10	20
Janeiro	59.4	74.1	87
Fevereiro	71.2	82.3	91.6
Março	126.4	141.4	153
Abril	151.2	158.9	162.8
Maio	192.7	197.1	197
Junho	207.9	209.2	206.1
Julho	206	208.8	207
Agosto	192	200.6	204.3
Setembro	145.4	159.6	169.8
Outubro	101.2	117.3	130.6
Novembro	60.5	72.7	83.4
Dezembro	47.6	59.6	70.3
Total	1561.4	1681.5	1762.9
G _{med}	130.1	140.1	146.9

Como seria de esperar, a radiação média mensal aumenta quando a inclinação do módulo fotovoltaico se aproxima da inclinação ideal. Contudo, por razões construtivas e de conforto dos utentes, a inclinação não pode ser superior a 10°.

Em aplicações ligadas à rede, o gerador fotovoltaico entrega à rede a máxima potência que pode produzir em cada instante. Entre o módulo e a rede existem equipamentos de regulação e interface, que otimizam as condições de geração e as adaptam às condições de receção impostas pela rede. Em termos esquemáticos, a situação pode ser descrita como se ilustra na Figura 6.2.

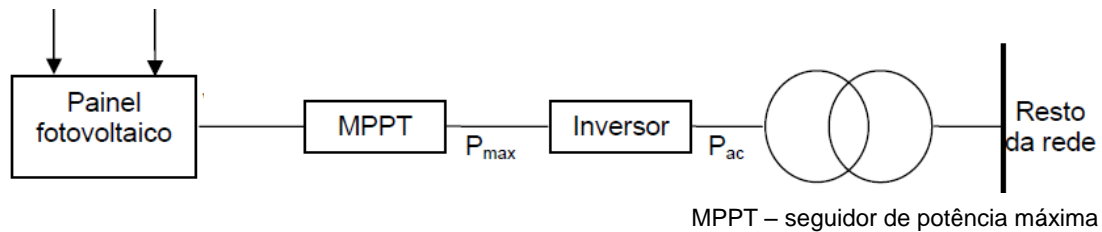


Fig.6.2 – Esquema de um gerador fotovoltaico ligado à rede

A potência máxima varia com as condições ambientais (temperatura e radiação) e com a tensão dos terminais do módulo, sendo naturalmente desejável o funcionamento sempre à máxima potência possível.

Por forma a colocar o módulo fotovoltaico no ponto de operação correspondente à potência máxima, os conversores fotovoltaicos possuem um sistema digital de cálculo da tensão à potência máxima (para cada par de valores radiação/temperatura), designado por seguidor de potência máxima (MPPT).

O facto de todos os conversores fotovoltaicos estarem equipados com este dispositivo reforça a necessidade de dispor de um método eficiente de cálculo da potência máxima (para as condições de temperatura e radiação existentes), pois é suposto que os módulos funcionem sempre nesse ponto de operação.

Em aplicações ligadas ao sistema de energia elétrica, é necessário também um inversor para colocar na rede a energia produzida pelo módulo fotovoltaico. Geralmente, o conjunto, MPPT mais inversor, é designado apenas por inversor.

O rendimento do inversor é dado por:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{AC}}{P_{max}} \quad (6.5)$$

em que P_{AC} é a potência entregue à rede.

Um valor normalmente tomado como referência para o conjunto de dispositivos eletrónicos de regulação e interface (MPPT e inversor) é de 90%. Esta simplificação será tomada na análise das várias alternativas, uma vez que nem todos os valores necessários dos módulos fotovoltaicos são fornecidos nem são especificados os inversores adequados.

6.1.1. SISTEMA FOTOVOLTAICO RÍGIDO

O sistema fotovoltaico rígido do *SmartPark Dual* é constituído por 36 módulos que incorporam a tecnologia monocristalina de silício. O módulo fotovoltaico atualmente aplicado corresponde a uma potência máxima de 240Wp. No anexo 5 encontra-se a ficha técnica do referido módulo.

A cobertura do *SmartPark*, onde estão assentes os módulos fotovoltaicos, encontra-se inclinada de 10°. Assim sendo, a radiação média anual incidente corresponde a 140.1kWh/m².

Utilizando o modelo simplificado para estimar a energia produzida, ao longo de um ano, são obtidos os resultados apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Resultados do estudo fotovoltaico – sistema rígido do SmartPark Dual

		Martifer
		MPrime - PV Modules 240W
Área	A (m ²)	1.61
Potência de pico	P _{max} (W)	240
Rendimento	η (%)	0.1491
nº painéis		36
Energia	E _a (kWh)	9543.3

O rendimento calculado de cada módulo fotovoltaico corresponde a 14,9%, tal como especificado na ficha técnica. Ao fim de um ano, o sistema fotovoltaico rígido produz aproximadamente 9500kWh.

6.1.2. SISTEMA FOTOVOLTAICO FLEXÍVEL

A empresa Serge Ferrari [4] desenvolveu uma membrana fotovoltaica com tecnologia de silício amorfo denominada de *Texysolar* (Fig.6.3). A solução pode ser aplicada em estruturas já existentes, ou em novos projetos.

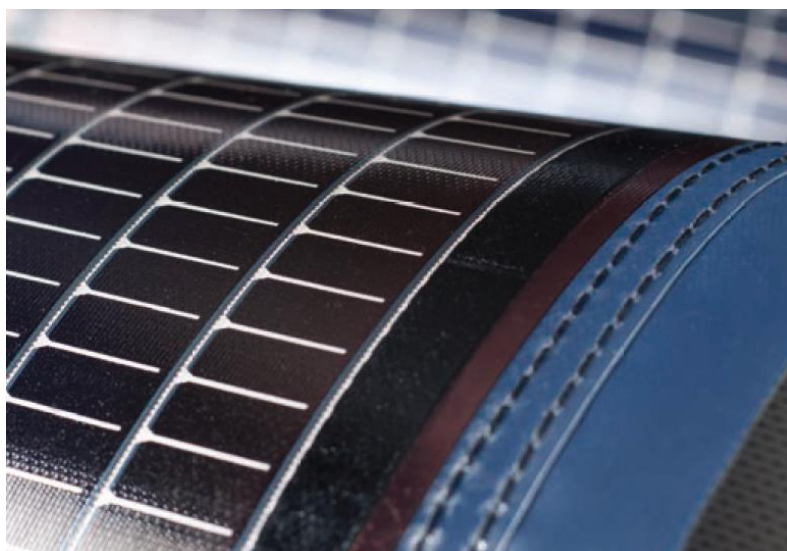


Fig.6.3 – Membrana fotovoltaica *Texysolar*

A membrana *Texysolar* diferencia-se dos convencionais módulos rígidos pela sua flexibilidade e baixo peso. Conjuga a tecnologia de filme fino fotovoltaico, da empresa PowerFilm [42], com as membranas *Précontraint*, da empresa Serge Ferrari.

A inovação desta tecnologia reside na ligação dos seus componentes. O filme fino fotovoltaico é costurado a uma base de silicone reforçada com fibras de vidro. Essa costura possibilita a existência de um intervalo de ar entre o filme fino e a base de silicone (Fig.6.4).

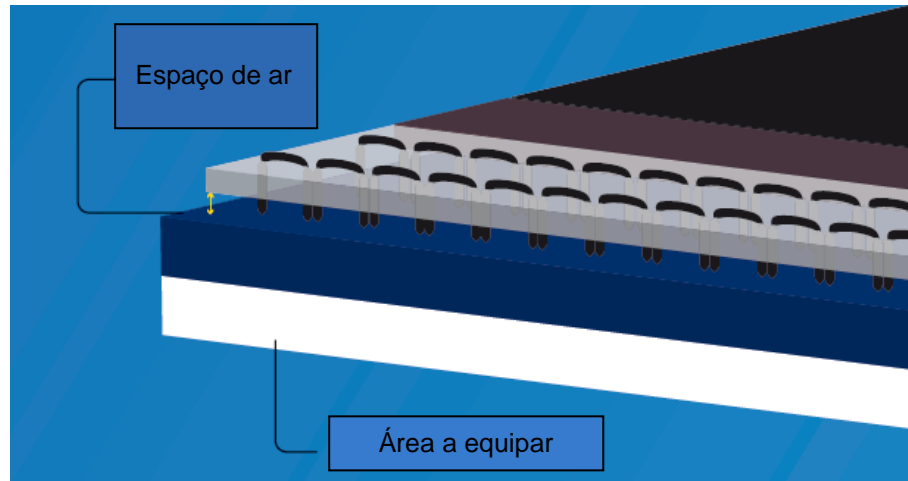


Fig.6.4 – Costura do filme fino à base de silicone

Os painéis, ao serem costurados e não soldados, ficam desligados da estrutura e consequentemente das cargas que poderiam ser transferidas. Esta montagem permite a circulação do ar, possibilitando a dissipação natural do calor. Desta forma, além de maior fiabilidade do sistema, é ainda assegurada maior durabilidade.

A ligação dos módulos fotovoltaicos com a membrana é efetuada por uma película aderente de alta resistência (Fig.6.5). Apenas é necessário retirar o revestimento protetor e aplicar diretamente na superfície. Consequentemente, a integridade da membrana de suporte é respeitada, não sendo necessário perfurar nem produzir qualquer modificação estrutural.

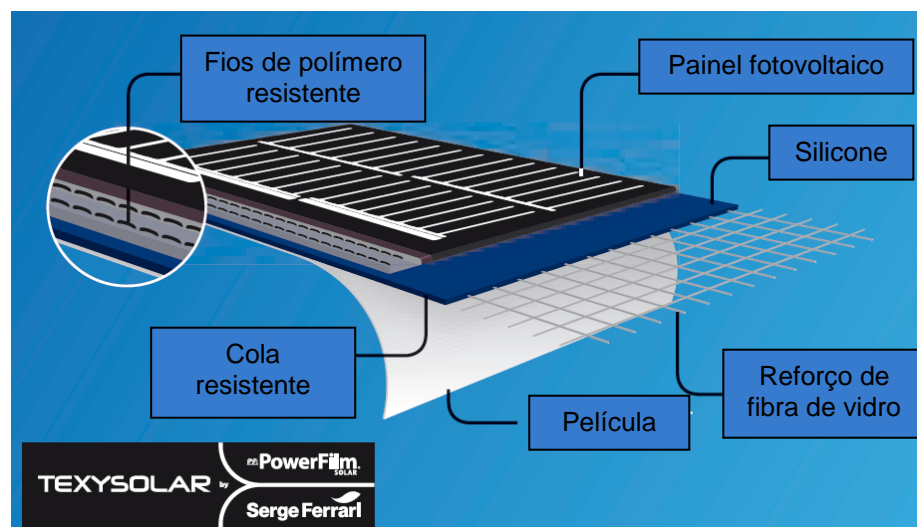


Fig.6.5 – Película aderente da solução *Texysolar*

A ficha técnica da membrana fotovoltaica *Texysolar* encontra-se no anexo 6. Além de apresentar as soluções disponíveis, indica as vantagens e as restantes características técnicas associadas a esta tecnologia.

São disponibilizados seis tipos de módulos fotovoltaicos, que diferem na potência de pico e nas dimensões geométricas. Para cada solução dos diferentes módulos fotovoltaicos, foi analisado o número de painéis admissível para colocação na cobertura de membrana. Na Fig.6.6 ilustram-se as diferentes disposições adotadas, consoante as dimensões dos painéis. Nas zonas de maior tensão, junto aos bordos, foi evitada a colocação de módulos, devido às elevadas tensões geradas e à inclinação extremamente variada.

Texysolar

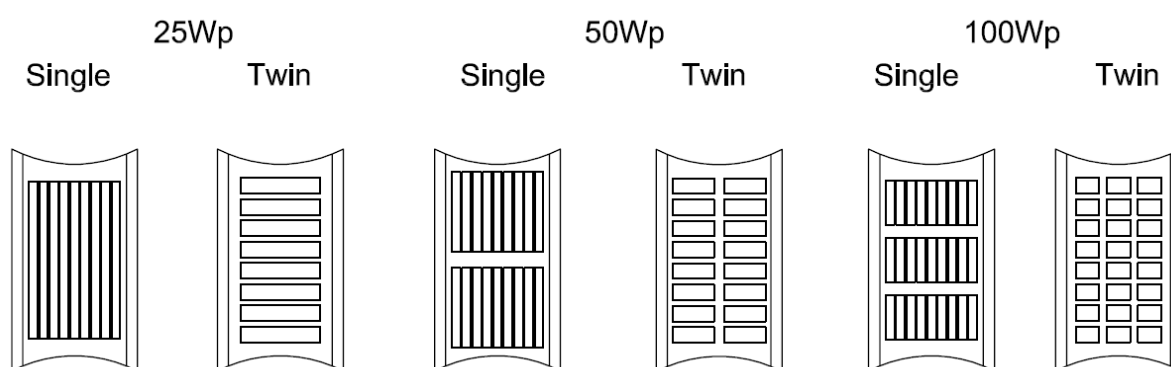


Fig.6.6 – Disposição dos painéis fotovoltaicos na cobertura de membrana

Assumindo uma análise simplificada, tendo em conta a disposição anteriormente apresentada, os resultados da estimativa da energia produzida são os seguintes:

Tabela 6.3 – Resultados do estudo fotovoltaico – sistema flexível

		Texysolar 25 Wp		Texysolar 50 Wp		Texysolar 100 Wp	
		Single	Twin	Single	Twin	Single	Twin
Área	A (m ²)	0.799	0.759	1.434	1.332	2.821	2.582
Potência de pico	P _{max} (W)	25	25	50	50	100	100
Rendimento	η (%)	0.0313	0.0329	0.0349	0.0375	0.0354	0.0387
nº painéis		54	48	36	32	18	16
Energia	E _a (kWh)	1491.14	1325.46	1988.19	1767.28	1988.19	1767.28

As soluções com painéis Texysolar 50Wp e 100 Wp, Single, são as mais rentáveis quanto à produção de energia elétrica. Contudo, apenas é produzido, aproximadamente, 2 MW por ano.

A eficiência dos módulos fotovoltaicos situa-se entre os 3 e 4%, um valor inferior ao do mercado. Este valor explica-se pela reduzida espessura da camada de silício, consequência da flexibilidade e leveza requerida por esta solução.

6.2. BALANÇO ECONÓMICO

Como em qualquer tipo de projeto com objetivo de retorno financeiro, a avaliação económica da solução em estudo pressupõe a avaliação de um conjunto de fatores-chave, tais como: estimativa do capital que é necessário investir, preço de venda da energia e outras despesas associadas. Em resumo, há que definir e estimar as receitas e os custos associados a cada solução.

O custo de investimento de sistemas fotovoltaicos é normalmente referido em custo por watt-pico (€/Wp). O custo inclui, tanto os módulos propriamente ditos, como os dispositivos de interface e regulação entre os coletores e a carga ou a rede. Estes dispositivos são tipicamente a bateria, regulador de carga e, eventualmente, inversor, no caso de sistemas isolados e apenas o inversor para os sistemas ligados à rede [2].

A receita a ter em conta com a implementação de um sistema fotovoltaico advém da venda contínua da energia produzida pelo mesmo à rede elétrica. O seu cálculo é efetuado através do produto entre a energia que foi estimada produzir, pela análise energética, e a tarifa imposta aquando a origem do projeto.

Todas as soluções em estudo correspondem a unidades de miniprodução, ou seja, a potência de ligação à rede, da instalação de produção da eletricidade, é igual ou inferior a 250 kW. A tarifa correspondente a este regime de produção é composta por uma tarifa bonificada de 0,25€/kWh durante os primeiros 15 anos do projeto, e nos restantes anos a tarifa normal de venda de eletricidade. A expressão utilizada para calcular a receita gerada é a seguinte:

$$Receita(€) = E_a(kWh) \times tarifa(€/kWh) \quad (6.6)$$

A energia produzida não é constante ao longo da vida útil do sistema, decai consoante o desgaste dos módulos fotovoltaicos. Normalmente, nas fichas técnicas dos painéis fotovoltaicos são fornecidas estimativas quanto a esse decaimento. O sistema rígido fotovoltaico, do SmartPark, após o segundo ano de funcionamento, apresenta um decaimento máximo de 0,68% por ano. No sistema flexível não são especificados valores. Contudo, sabe-se que em média esta tecnologia apresenta um decaimento de 1%.

O projeto de um sistema fotovoltaico tem como objetivo 25 anos de vida útil. Contudo, apenas serão estudados os primeiros 15 anos, que correspondem ao intervalo de tempo associado à tarifa de bonificação.

Os custos associados ao projeto referem-se, essencialmente, ao investimento em capital fixo, o qual é constituído por vários itens necessários ao funcionamento de um sistema de produção de energia, podendo ser dividido em corpóreo e incorpóreo. O capital fixo corpóreo engloba todos os custos do equipamento necessários à implementação do projeto. Nesta parcela são contabilizados os custos do equipamento base: módulos fotovoltaicos e sistema de ligação, estrutura e construção civil, entre outros custos menos relevantes. Do capital fixo incorpóreo fazem parte todas as despesas intrínsecas ao projeto, isto é, *design* do processo (engenharia), fiscalização, escrituras, registos e impostos associados, despesas de empreitada e ainda provisão para imprevistos.

Apenas serão avaliados os custos associados ao capital fixo corpóreo, os quais são relevantes para o estudo em questão: módulos fotovoltaicos e sistema de ligação, estrutura metálica de suporte e estrutura de membrana tensa.

Por simplificação, para o cálculo do custo da estrutura de suporte serão adotados valores típicos do custo de estruturas metálicas. Para os tubos estruturais é razoável adotar 1.8€/kg, tendo já em atenção o desperdício de material, os custos de montagem, de transporte e os custos indiretos.

Para a membrana será adotado um valor médio de 200€/m². Este custo engloba os custos de material, montagem e os restantes acessórios deste sistema.

A estimativa de custos dos painéis fotovoltaicos e restante sistema de ligação será baseada em valores do mercado. Para o conjunto de módulos rígidos e sistema de ligação, segundo valores de mercado, será adotado um valor de 9500€. Para o sistema fotovoltaico flexível, foi indicado um valor aproximado de 14€/Wp.

Embora o custo dos dispositivos de interface e regulação e os custos de instalação possam variar muito, pode afirmar-se que, em termos médios, cerca de 50% do investimento total se refere aos módulos, incluindo-se nos restantes 50% o custo dos dispositivos de interface e regulação e respetivas ligações elétricas e os custos de instalação. Os custos de operação e manutenção são também muito variáveis, mas pode estimar-se que se situem, em média, em torno de 1 a 2% do investimento total.

Os resultados obtidos, segundo o estudo simplificado, são apresentados na tabela 6.4. Como se observa, o custo dos sistemas fotovoltaicos flexíveis é substancialmente superior ao rígido. Este facto deve-se à recente exploração da tecnologia de filme fino fotovoltaico, que ainda apresenta eficiência reduzida.

Tabela 6.4 – Resultados do estudo económico

	MPrime	Texysolar					
	Mono - Si	25 Wp - Single	25 Wp - Twin	50 Wp - Single	50 Wp - Twin	100 Wp - Single	100 Wp - Twin
Receita							
Energia produzida - 1 ano (kWh)	9543	1491	1325	1988	1767	1988	1767
Energia produzida - 15 anos (kWh)	137244	20801	18490	27735	24654	27735	24654
Receita (€)	34311	5200	4623	6934	6163	6934	6163
Custos (€)							
Módulos e sistema de ligação	9500	18900	16800	25200	22400	25200	22400
Estrutura de suporte	4892	6914	6914	6914	6914	6914	6914
Custo Total	14392	25814	23714	32114	29314	32114	29314
Resultado económico							
Total (€)	-19919	20614	19092	25180	23151	25180	23151

Deste modo, enquanto no sistema rígido o aproveitamento da energia solar permite a recuperação do investimento inicial em poucos anos, entre 5-8 anos, no sistema flexível esse horizonte não é possível, uma vez que o tempo de retorno seria superior ao tempo de vida útil da estrutura.

6.3. COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES

O sistema fotovoltaico rígido, quando comparado com as soluções flexíveis, apresenta melhores resultados quanto ao aproveitamento fotovoltaico, bem como nos custos associados. Contudo, não foram analisados parâmetros importantes, como a influência da temperatura, o efeito de sombreamento e a implementação em locais de reduzida radiação solar incidente.

As células de filme fino oferecem um maior aproveitamento para baixos níveis de radiação e para radiações do tipo difusa. Para além disso, o coeficiente de temperatura é mais favorável, isto é, a deterioração do desempenho para elevadas temperaturas é menor do que a que se verifica com outras tecnologias. As películas finas devido à sua forma celular (longas e estreitas fitas) são menos sensíveis aos efeitos de sombreamento.

Outra característica positiva das células de filme fino advém do seu reduzido peso, que possibilita a implementação de sistemas fotovoltaicos em estruturas de membrana tensa. Se a estrutura de suporte for providenciada por membrana, a utilização de módulos fotovoltaicos rígidos fica inviabilizada, sendo a única solução a utilização de painéis em filme fino flexível.

A tipologia flexível mais rentável, das soluções em estudo, corresponde à solução em painéis Texysolar 25Wp – Twin, apresentada na Fig.6.7.

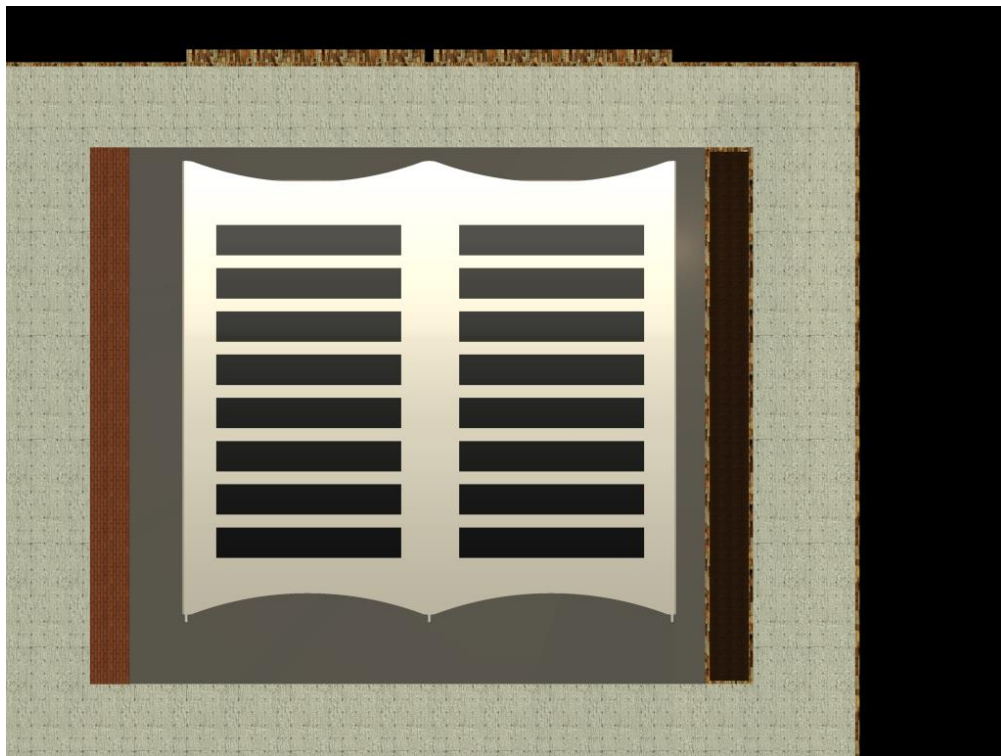


Fig.6.7 – Solução Texysolar 25Wp – Twin

A aplicação em estudo apenas será competitiva em zonas remotas, em que a rede elétrica não chegue, ou em regiões do mundo com bons níveis de radiação e eletricidade muito cara. A competição com os módulos fotovoltaicos rígidos só será possível quando a tecnologia de filme fino atingir maiores eficiências, aliadas a menores preços.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer do presente trabalho foram expostas as condições técnicas de análise, dimensionamento e preparação de um projeto de uma estrutura em membrana tensa. Além da resposta não-linear geométrica, estas estruturas são peculiares devido ao seu reduzido peso e à sua esbelteza.

A integração de painéis fotovoltaicos neste tipo de estrutura é ainda num desafio, quer pelo método de junção, quer pela escolha da tecnologia fotovoltaica adequada. Os painéis devem ser o mais leves possível e flexíveis nas duas direções. A sua ligação com a membrana deve ser cuidada, uma vez que é necessário garantir que as tensões geradas pelos diferentes carregamentos, não são transferidas para os painéis. Devido ao aquecimento das células fotovoltaicas, a membrana pode ser danificada. Assim sendo, é necessária a criação de um espaço de ar entre a membrana e os painéis, para arejamento das células, ou mesmo o reforço da membrana e a escolha de uma tecnologia fotovoltaica que, não atinja temperatura nocivas para a membrana.

Em primeiro lugar foi estudada a solução rígida do *SmartPark*. Este sistema é composto por uma estrutura de suporte de perfis de aço enformados a frio e uma cobertura de painéis rígidos fotovoltaicos em silício monocristalino.

Quanto à estrutura de suporte, os perfis de aço enformados a frio, da solução *SmartPark*, permitem uma estrutura segura, leve, eficiente e económica. Contudo, a análise deste tipo de estruturas torna-se mais trabalhosa do que a de estruturas metálicas convencionais. A forma como os Eurocódigos são apresentados e a ordenação das suas disposições regulamentares, nem sempre é fácil de ser compreendida. Em especial, o EC3-Parte-1-3, relativo a estruturas de aço com perfis enformados a frio, não facilita a conciliação das disposições específicas destes perfis com as normas gerais do EC3-Parte-1-1. Na presente dissertação foram introduzidos os conceitos básicos associados a este grupo de perfis e a metodologia de dimensionamento de uma estrutura constituída por perfis de aço enformados a frio. Contudo, em abordagens futuras seria recomendada a análise completa das secções e a determinação das suas propriedades efetivas de forma exata.

O sistema estrutural em membrana tensa apoia-se numa estrutura de suporte em aço laminado a quente com perfis de secção oca tubular. O seu dimensionamento foi regido pelas disposições do EC3-Parte 1-1, tal como é habitual nas estruturas metálicas convencionais.

Quando comparadas as duas soluções em estudo, torna-se evidente que o sistema estrutural rígido além de ser mais económico, proporciona um melhor aproveitamento da energia solar incidente. A deficiente competitividade do sistema fotovoltaico flexível deve-se à reduzida eficiência aliada ao

elevado custo que a tecnologia aplicada ainda apresenta. Futuramente, com o avanço da tecnologia fotovoltaica pode tornar-se possível o projeto de uma solução economicamente rentável.

A solução flexível fotovoltaica selecionada gera, aproximadamente, 1300 kWh de energia elétrica por ano, enquanto a solução fotovoltaica rígida produz 9500 kWh, sensivelmente sete vezes mais. Contudo, salienta-se que a estimativa apresentada deriva de uma metodologia simplificada que, não tem em conta a variação da eficiência dos diferentes sistemas fotovoltaicos quando expostos a luminosidade reduzida, ou a condições de temperatura elevada. Um desenvolvimento futuro poderá passar por uma estimativa rigorosa da energia produzida e o estudo da aplicação de diferentes tecnologias de filme fino fotovoltaico. Como foi referido, a tecnologia de filme fino pode obter eficiência da ordem dos 7%. Contudo é necessário adequar os painéis resultantes para aplicação em membranas tensas.

A solução em membrana tensa adequa-se a parques de estacionamento com requisitos estéticos e de incorporação arquitetónica específica. Quando a estrutura requerida é desta tipologia, a única solução fotovoltaica viável consiste na aplicação de filme fino flexível.

O sistema fotovoltaico flexível torna-se competitivo para alimentação de locais onde as soluções alternativas convencionais são inacessíveis ou inferiores do ponto de vista económico, para além dos variados inconvenientes ambientais apresentados.

Face à complexidade que envolve todo o processo de dimensionamento de uma estrutura de cabos e de membranas, todo ele é baseado em simplificações e hipóteses supostamente no sentido conservativo, não permitindo o conhecimento real do nível de segurança, associado a determinada estrutura, além de não permitir a otimização dos materiais e forma associados. Em trabalhos futuros seria aconselhável projetar diferentes tipologias estruturais e a consequente interação com o sistema fotovoltaico.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Proença, E.D.R.B., *A energia fotovoltaica solar em Portugal*, in *Instituto Superior Técnico* 2007, Universidade Técnica de Lisboa.
- [2]. Calaia, F.J.d.S., *Estudo comparativo de três tecnologias fotovoltaicas*, in *Engenharia Mecânica* 2011, Universidade de Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- [3]. Moreira, R.E.F., *Utilização de membranas tensionadas na execução de estruturas especiais*, in *MIEC - Estruturas* 2008, Universidade do Porto: FEUP. p. 104.
- [4]. Ferrari, S. *Serge Ferrari*. [cited 2013 23-06-2013]; Available from: <http://www.sergeferrari.com/>.
- [5]. Framing, L.S. *Light Steel Framing*. Available from: <http://www.futureeng.pt/galvanizacao>.
- [6]. CITYSÍ. *CITYSÍ*. 02-03-2012]; Available from: <http://www.citysi.it/>.
- [7]. Barbieri, G. *Giulio Barbieri*. 04-03-2013]; Available from: <http://www.giuliobarbieri.it/>.
- [8]. MakMax. *MakMax*. 02-03-2013]; Available from: <http://www.makmax.com/>.
- [9]. Tyagi, V.V., et al., *Progress in solar PV technology: Research and achievement*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **20**(0): p. 443-461.
- [10]. ALTENER, *Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação*, 2004.
- [11]. Candelise, C., J.F. Speirs, and R.J.K. Gross, *Materials availability for thin film (TF) PV technologies development: A real concern?* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(9): p. 4972-4981.
- [12]. Gorter, T. and A.H.M.E. Reinders, *A comparison of 15 polymers for application in photovoltaic modules in PV-powered boats*. Applied Energy, 2012. **92**(0): p. 286-297.
- [13]. Hoffmann, W. and T. Pellkofer, *Thin films in photovoltaics: Technologies and perspectives*. Thin Solid Films, 2012. **520**(12): p. 4094-4100.
- [14]. Konarka. *Konarka*. 03-03-2013]; Available from: <http://www.konarka.com/>.
- [15]. Greenpark. *Greenpark*. 04-03-2013]; Available from: <http://www.greenparksrl.it/>.
- [16]. Solar, M. *Martifer Solar*. 04-03-2013]; Available from: <http://www.martifersolar.com>.
- [17]. MPrime. *MPrime by Martifer solar*. 22-05-2013]; Available from: <http://www.mprimesolar.com/>.
- [18]. Kessler, F., D. Herrmann, and M. Powalla, *Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells*. Thin Solid Films, 2005. **480–481**(0): p. 491-498.
- [19]. Martin Helgesen, R.S.a.F.C.K., *Advanced materials and processes for polymer solar cell devices*. Journal of Materials Chemistry, 2009.
- [20]. Next, S. *Solar Next*. 04-03-2013]; Available from: <http://www.solarnext.eu>.
- [21]. Skyshades. *SkyShades*. 04-03-2013]; Available from: <http://www.skyshades.co.uk/>.
- [22]. Sims, L., et al., *1.20 - Plastic Solar Cells*, in *Comprehensive Renewable Energy*, S. Editor-in-Chief: Ali, Editor. 2012, Elsevier: Oxford. p. 439-480.

- [23]. Hightex. *Hightex*. 07-03-2013]; Available from: <http://www.hightexworld.com/solar-energy/pv-flexibles>.
- [24]. Mollaert, B.F.M., *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. 2004.
- [25]. Ferreira, P.G.M.d.Q., *Análise e dimensionamento de uma estrutura de cobertura em membrana tensa*, ed. E.d.S. Caetano. 2010, Porto:: [s. n.].
- [26]. Pauletti, R., *Tensoestruturas - Ideias Básicas*. 1999, Escola Politécnica USP.
- [27]. Seidel, M., *Tensile Surface Structures: A practical guide to cable and membrane construction*. 2009, Berlin: Ernst & Sohn.
- [28]. CEN, *Eurocódigo 1 - Ações em estruturas*, in *Parte 1-4: Ações gerais - Ações do vento* 2010.
- [29]. CEN, *Eurocódigo 1 - Ações em estruturas*, in *Parte 1-3: Ações gerais - Ação da neve* 2009.
- [30]. FORTEN2000, Baku Group DT.
- [31]. SAP2000, *SAP2000*, 2008, Computers and structures, Inc.: Berkeley.
- [32]. Li, Z., Schafer, B.W., *Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods*. Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures Saint Louis, Missouri, USA, 2010.
- [33]. CEN, *Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos*, in *Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios* 2009.
- [34]. Veríssimo, H., *Dimensionamento de Elementos Estruturais de aço enformados a frio de acordo com o Eurocódigo 3*, in *Instituto Superior Técnico* 2008, Universidade Técnica de Lisboa.
- [35]. Pinto, A.E.M.R., *Estabilidade Local de Perfis de Aço Enformados a Frio*, in *Instituto Superior Técnico* 2010, Universidade Técnica de Lisboa.
- [36]. Yu, W.W., *Cold-Formed Steel Structures*, in *Structural Engineering Handbook*, C. Wai-Fah, Editor. 1999.
- [37]. CEN, *Eurocode 3 - Design of steel structures*, in *Part 1-3: General rules - Supplementary rules of cold-formed members and sheeting* 2006.
- [38]. Institute, A.I.a.S., *Appendix 1, Design of Cold-Formed Steel Structural Members Using Direct Strength Method*, in *Supplement 2004 to the North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* 2004.
- [39]. Institute, A.I.a.S., *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, 2001.
- [40]. CEN, *Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço*, in *Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios* 2009.
- [41]. Castro, R.M.G., *Introdução à energia fotovoltaica*. 2008, Universidade Técnica de Lisboa: Instituto técnico de Lisboa.
- [42]. Solar, P. *PowerFilm Solar*. 28-05-2013]; Available from: <http://www.powerfilmsolar.com/>.

ANEXOS

Anexo 1. Catálogo *MadreMax*

Anexo 2. Folhas de cálculo – Verificação de segurança da estrutura rígida

Anexo 3. Folhas de cálculo – Método da Resistência Direta

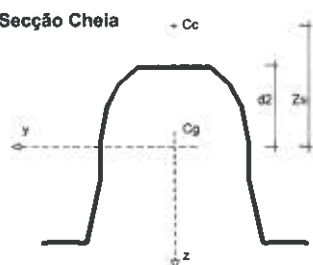
Anexo 4. Folhas de cálculo – Verificação de segurança da estrutura flexível

Anexo 5. Ficha técnica MPrime –PV Modules 240-255 W

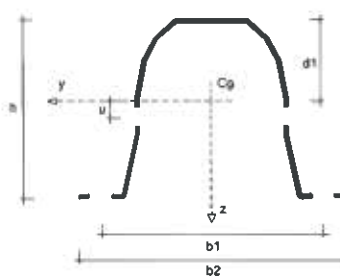
Anexo 6. Ficha técnica *Texysolar*

Anexo 1. Catálogo *MadreMax*

Secção Cheia



Secção Furada



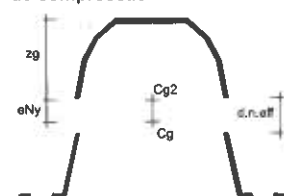
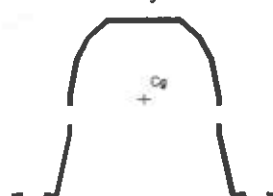
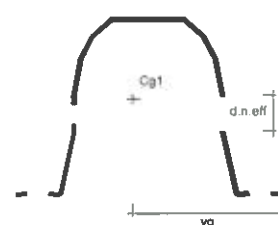
Secção transversal bruta

	b1 mm	t mm	G kg/m	h mm	b2 mm	d1 mm	d2 mm	z _s mm
12 100x1.5	100	1.5	3.33	103.2	123.9	49.5	53.1	85.7
12 150x1.5	150	1.5	4.65	145.8	179.0	68.2	72.9	123.8
12 200x2.0	200	2.0	9.30	227.5	238.3	108.4	113.2	194.7
	A. cheia mm ²	A. furada mm ²	I _y mm ⁴	W _{ply} mm ³	W _{el,y,min} mm ³	I _y mm ⁴	A _{yz} mm ²	
12 100x1.5	441.7	381.3	52407.1	12826.0	9766.9	37.1	282.6	
12 150x1.5	617.9	545.6	146282.9	25401.3	18830.3	51.8	410.4	
12 200x2.0	1237.6	1141.1	730218.7	81781.2	61291.8	80.0	874.2	
	I _z mm ⁴	W _{ply,z} mm ³	W _{el,z,min} mm ³	I _z mm ⁴	I _y mm ⁴	I _w mm ⁶		
12 100x1.5	382123	11240.2	6166.2	31.7	332.2	2.2730E+08		
12 150x1.5	1318815	25041.2	14738.1	49.2	464.3	1.1763E+09		
12 200x2.0	4937445	70732.2	41446.5	65.8	1650.1	1.0290E+10		
	desenv. mm	A. pintar mm ² /m	d. Furos mm	parafuso desig.	u mm	classe da secção		
						My	Mz	N
12 100x1.5	295.3	0.59	10.0	M8	2.8	4	4	4
12 150x1.5	412.7	0.83	12.0	M10	6.3	4	4	4
12 200x2.0	618.8	1.24	12.0	M10	6.6	4	4	4

Secção transversal efectiva

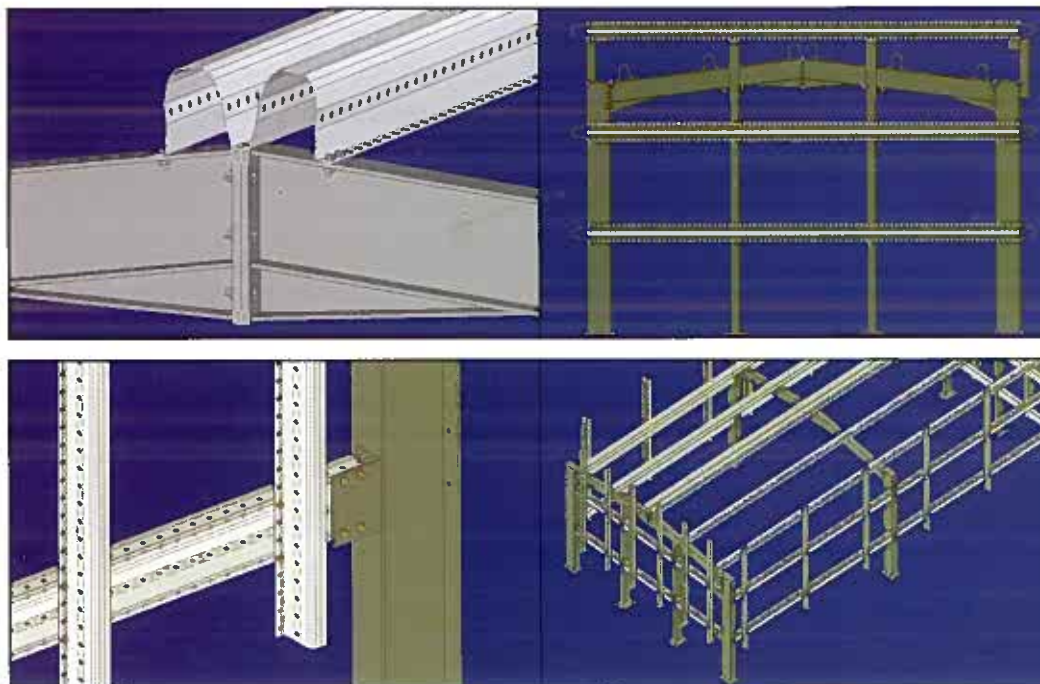
	I _{eff,y} mm ⁴	W _{eff,y,min} mm ³	d. n. eff mm	I _{eff,z} mm ⁴	yg mm	W _{eff,z,min} mm ³	A _{eff} mm ²	zg mm	e _{Ny} mm
12 100x1.5	52407.1	9766.9	44	324268	66.8	4851.9	278.43	48.5	1.0
12 150x1.5	146282.9	18830.3	89	931629	103.4	9006.9	310.19	63.6	4.6
12 200x2.0	730218.7	61291.8	132	3586035	137.0	26184.8	657.62	103.7	4.7

Secção transversal efectiva

esforço axial
de compressãomomento flector
em torno do eixo ymomento flector
em torno do eixo z

Principais Vantagens

- Flexibilidade de soluções;
- Aligeiramento da estrutura;
- Aparafusamento directo ao pilar e ao pórtico;
- Economia de material, mão de obra, fabrico e montagem;
- Facilidade de movimentação;
- Rapidez de montagem;
- Dispensa de:
 - suportes de fixação das madres (patilhas),
 - conectores,
 - tirantes entre madres,
 - vigas armadas (treliças nas fachadas),
 - chapa de cumeeira interior.



Anexo 2. Folhas de cálculo – Verificação de segurança da estrutura rígida

Pórtico de Extremidade - Pilar - Secção Tubular

Secção

I_z (mm ⁴)	2571385
I_y (mm ⁴)	9195248
i_z (mm)	48.54
i_y (mm)	91.80
A_{eff} (mm ²)	1091.2
A (mm ²)	1235.8
I_T (mm ⁴)	938
I_w (mm ⁶)	197894880279
$W_{eff,y}$ (mm ³)	63198
$W_{eff,z}$ (mm ³)	28103

Material

f_y (N/mm ²)	320
E (GPa)	210
G (Gpa)	81

Compressão

$l_{cr,z}$ (m)	3.3
$l_{cr,y}$ (m)	2.5

λ_i	80.4794
λ_z	0.7937
λ_y	0.3180
λ	0.7937

α	0.340
ϕ	0.916
χ	0.728
χ	0.728

$N_{b,rd}$	254.31	Verificação	1
N_{Ed}	16.66		

Dispensa de encurvadura

	z	y	λ
N_{cr}	489.4	3049.3	0.794
N_{Ed}/N_{cr}	0.034	0.005	

Flexão y

C_1	1
L_{cr}	2.5
α	0.34

$M_{c,rd}$	20.2
M_{cr}	236.7

λ_{LT}	0.292
ϕ_{LT}	0.514
χ_{LT}	1.041
χ_{limite}	11.704
$\chi_{LT,último}$	1.000

$M_{b,rd}$	20.22	Verificação	1
M_{Ed}	2.34		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	236.7	0.292
M_{Ed}/M_{cr}	0.010	

Flexão z

C_1	1
L_{cr}	3.3
α	0.34

$M_{c,rd}$	9.0
M_{cr}	257.0

λ_{LT}	0.187
ϕ_{LT}	0.477
χ_{LT}	1.081
χ_{limite}	28.577
$\chi_{LT,último}$	1.000

$M_{b,rd}$	8.99	Verificação	1
M_{Ed}	0.00		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	257.0	0.187
M_{Ed}/M_{cr}	0.000	

Verificação Esforços

Coefficiente	0.8	0.11	0.18	0.00	0.29
--------------	-----	------	------	------	------

Interação de Esforços

e_{Ny}	0.000	e_{Nz}	0.000
0.066	0.116	0.000	0.18

Interação de Esforços - Barra

K_{yy}	0.4050
K_{yz}	0.0000
K_{zy}	0.9827
K_{zz}	0.0000

C_{my}	0.4
C_{mz}	0.4
C_{mLT}	0.4

0.066	0.047	0.000	0.11
-------	-------	-------	------

0.066	0.114	0.000	0.18
-------	-------	-------	------

Pórtico de Extremidade - Viga - Secção Dupla

Secção

I_z (mm ⁴)	1863258
I_y (mm ⁴)	2925658
i_z (mm)	54.80
i_y (mm)	68.67
A_{eff} (mm ²)	620.38
A (mm ²)	1091.2
I_T (mm ⁴)	928.6
I_w (mm ⁶)	2352600000
$W_{eff,y}$ (mm ³)	37556.0
$W_{eff,z}$ (mm ³)	20702.9

Material

f_y (N/mm ²)	320
E (GPa)	210
G (Gpa)	81

Compressão

$L_{cr,z}$ (m)	1
$L_{cr,y}$ (m)	1

λ_l	80.4794
λ_z	0.1710
λ_y	0.1364
λ	0.1710

α	0.340
ϕ	0.510
χ	1.010
χ	1.000

$N_{b,rd}$	198.52	Verificação	1
N_{Ed}	11.45		

Dispensa de encurvadura

	z	y	λ
N_{cr}	3861.8	6063.8	0.171
N_{Ed}/N_{cr}	0.003	0.002	

Flexão y

C_1	1
L_{cr}	1
α	0.34

$M_{c,rd}$	12.018
M_{cr}	138.278

λ_{LT}	0.29481
Φ_{LT}	0.51471
χ_{LT}	1.03990
χ_{limite}	11.50600
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	12.02	Verificação	1
M_{Ed}	3.16		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	138.3	0.295
N_{Ed}/N_{cr}	0.023	

Flexão z

C_1	1
L_{cr}	1
α	0.34

$M_{c,rd}$	6.625
M_{cr}	173.272

λ_{LT}	0.19554
Φ_{LT}	0.47958
χ_{LT}	1.07728
χ_{limite}	26.15462
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	6.62	Verificação	1
M_{Ed}	0.00		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	173.3	0.196
N_{Ed}/N_{cr}	0.000	

Verificação Esforços

Coeficiente	0.8	0.10	0.34	0.00	0.45
-------------	-----	------	------	------	------

Interação de Esforços - Secção

e_{Ny}	0.005	e_{Nz}	0.000
0.058	0.267	0.000	0.32

Interação de Esforços - Barra

K_{yy}	0.6028	C_{my}	0.6
K_{yz}	0.0000	C_{mz}	0.6
K_{zy}	0.9986	C_{mLT}	0.6
K_{zz}	0.0000		
0.058	0.161	0.000	0.22
0.058	0.267	0.000	0.32

Pórtico de Extremidade - Viga

Secção

I_z (mm ⁴)	8620000
I_y (mm ⁴)	8620000
i_z (mm)	46.02
i_y (mm)	46.02
A_{eff} (mm ²)	4070
A (mm ²)	4070
I_T (mm ⁴)	17240000
I_w (mm ⁶)	247000000
$W_{eff,y}$ (mm ³)	123000
$W_{eff,z}$ (mm ³)	123000

Material

f_y (N/mm ²)	275
E (GPa)	210
G (Gpa)	81

Compressão

$L_{cr,z}$ (m)	5.5
$L_{cr,y}$ (m)	5.5

λ_l	86.8147
λ_z	1.3766
λ_y	1.3766
λ	1.3766

α	0.130
ϕ	1.524
χ	0.459
χ	0.459

$N_{b,rd}$	513.91	Verificação	1
N_{Ed}	3.00		

Dispensa de encurvadura

	z	y	λ
N_{cr}	590.6	590.6	1.377
N_{Ed}/N_{cr}	0.005	0.005	

Flexão y

C_1	1
L_{cr}	5.5
α	0.13

$M_{c,rd}$	33.825
M_{cr}	908.164

λ_{LT}	0.19299
ϕ_{LT}	0.50051
χ_{LT}	1.02850
χ_{limite}	26.84890
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	33.83	Verificação	1
M_{Ed}	31.70		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	908.2	0.193
N_{Ed}/N_{cr}	0.035	

Flexão z

C_1	1
L_{cr}	5.5
α	0.13

$M_{c,rd}$	33.825
M_{cr}	908.164

λ_{LT}	0.19299
ϕ_{LT}	0.50051
χ_{LT}	1.02850
χ_{limite}	26.84890
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	33.83	Verificação	1
M_{Ed}	0.00		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	908.2	0.193
N_{Ed}/N_{cr}	0.000	

Verificação Esforços

Coeficiente	0.8	0.02	0.95	0.00	0.97
-------------	-----	------	------	------	------

Interação de Esforços - Secção

e_{Ny}	0.000	e_{Nz}	0.000
----------	-------	----------	-------

0.006	0.937	0.000	0.94
-------	-------	-------	------

Interação de Esforços - Barra

K_{yy}	0.6021
K_{yz}	0.0000
K_{zy}	0.9992
K_{zz}	0.0000

C_{my}	0.6
C_{mz}	0.6
C_{mLT}	0.6

0.006	0.564	0.000	0.57
-------	-------	-------	------

0.006	0.936	0.000	0.94
-------	-------	-------	------

Pórtico Intermédio - Pilar - Secção Tubular

Secção

I_z (mm ⁴)	2571385
I_y (mm ⁴)	9195248
i_z (mm)	48.54
i_y (mm)	91.80
A_{eff} (mm ²)	1091.2
A (mm ²)	1235.8
I_T (mm ⁴)	938
I_w (mm ⁶)	197894880279
$W_{eff,y}$ (mm ³)	63198
$W_{eff,z}$ (mm ³)	28103

Material

f_y (N/mm ²)	320
E (GPa)	210
G (Gpa)	81

Compressão

$l_{cr,z}$ (m)	3.3
$l_{cr,y}$ (m)	2.5

λ_l	80.4794
λ_z	0.7937
λ_y	0.3180
λ	0.7937

α	0.340
ϕ	0.916
χ	0.728
χ	0.728

$N_{b,rd}$	254.31	Verificação	1
N_{Ed}	24.68		

Dispensa de encurvadura

	z	y	λ
N_{cr}	489.4	3049.3	0.794
N_{Ed}/N_{cr}	0.050	0.008	

Flexão y

C_1	1
L_{cr}	2.5
α	0.34

$M_{c,rd}$	20.2
M_{cr}	236.7

λ_{LT}	0.292
ϕ_{LT}	0.514
χ_{LT}	1.041
χ_{limite}	11.704
$\chi_{LT,último}$	1.000

$M_{b,rd}$	20.22	Verificação	1
M_{Ed}	4.36		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	236.7	0.292
M_{Ed}/M_{cr}	0.018	

Flexão z

C_1	1
L_{cr}	3.3
α	0.34

$M_{c,rd}$	9.0
M_{cr}	257.0

λ_{LT}	0.187
ϕ_{LT}	0.477
χ_{LT}	1.081
χ_{limite}	28.577
$\chi_{LT,último}$	1.000

$M_{b,rd}$	8.99	Verificação	1
M_{Ed}	0.00		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	257.0	0.187
M_{Ed}/M_{cr}	0.000	

Verificação Esforços

Coefficiente	0.8	0.15	0.29	0.00	0.45
--------------	-----	------	------	------	------

Interação de Esforços

e_{Ny}	0.000	e_{Nz}	0.000
0.097	0.216	0.000	0.31

Interação de Esforços - Barra

K_{yy}	0.4074
K_{yz}	0.0000
K_{zy}	0.9743
K_{zz}	0.0000

C_{my}	0.4
C_{mz}	0.4
C_{mLT}	0.4

0.097	0.088	0.000	0.18
-------	-------	-------	------

0.097	0.210	0.000	0.31
-------	-------	-------	------

Pórtico Intermédio - Viga - Secção Dupla

Secção

I_z (mm ⁴)	1863258
I_y (mm ⁴)	2925658
i_z (mm)	54.80
i_y (mm)	68.67
A_{eff} (mm ²)	620.38
A (mm ²)	1091.2
I_T (mm ⁴)	928.6
I_w (mm ⁶)	2352600000
$W_{eff,y}$ (mm ³)	37556.0
$W_{eff,z}$ (mm ³)	20702.9

Material

f_y (N/mm ²)	320
E (GPa)	210
G (Gpa)	81

Compressão

$L_{cr,z}$ (m)	1
$L_{cr,y}$ (m)	1

λ_l	80.4794
λ_z	0.1710
λ_y	0.1364
λ	0.1710

α	0.340
ϕ	0.510
χ	1.010
χ	1.000

$N_{b,rd}$	198.52	Verificação	1
N_{Ed}	11.24		

Dispensa de encurvadura

	z	y	λ
N_{cr}	3861.8	6063.8	0.171
N_{Ed}/N_{cr}	0.003	0.002	

Flexão y

C_1	1
L_{cr}	1
α	0.34

$M_{c,rd}$	12.018
M_{cr}	138.278

λ_{LT}	0.29481
Φ_{LT}	0.51471
χ_{LT}	1.03990
χ_{limite}	11.50600
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	12.02	Verificação	1
M_{Ed}	4.85		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	138.3	0.295
N_{Ed}/N_{cr}	0.035	

Flexão z

C_1	1
L_{cr}	1
α	0.34

$M_{c,rd}$	6.625
M_{cr}	173.272

λ_{LT}	0.19554
Φ_{LT}	0.47958
χ_{LT}	1.07728
χ_{limite}	26.15462
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	6.62	Verificação	1
M_{Ed}	0.00		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	173.3	0.196
N_{Ed}/N_{cr}	0.000	

Verificação Esforços

Coeficiente	0.8	0.10	0.48	0.00	0.58
-------------	-----	------	------	------	------

Interação de Esforços - Secção

e_{Ny}	0.005	e_{Nz}	0.000
0.057	0.408	0.000	0.46

Interação de Esforços - Barra

K_{yy}	0.4019	C_{my}	0.4
K_{yz}	0.0000	C_{mz}	0.4
K_{zy}	0.9968	C_{mLT}	0.4
K_{zz}	0.0000		
0.057	0.164	0.000	0.22
0.057	0.407	0.000	0.46

Madre - Seção Simples

Flexão em y

E (Gpa)	210
G (Gpa)	81
f_{yb} (N/mm ²)	320
$W_{eff,y}$ (mm ³)	18830.3
I_z (mm ⁴)	931629
I_T (mm ⁴)	464.3
I_w (mm ⁶)	1176300000

C_1	1
L_{cr}	1
α	0.34

$M_{c,rd}$	6.0
M_{cr}	69.1

λ_{LT}	0.29522
ϕ_{LT}	0.51487
χ_{LT}	1.03974
χ_{limite}	11.47404
$\chi_{LT,último}$	1.00000

$M_{b,rd}$	6.0	Verificação	1
M_{Ed}	2.7		

Dispensa de encurvadura

	z	λ
M_{cr}	69.1	0.295
M_{Ed}/M_{cr}	0.039	

Madre - Secção Dupla

Flexão em y

E (Gpa)	210
G (Gpa)	81
f_{yb} (N/mm ²)	320
$W_{eff,y}$ (mm ³)	37556.0
I_z (mm ⁴)	1863258
I_T (mm ⁴)	928.6
I_w (mm ⁶)	2414676465

C_1	1
L_{cr}	1
α	0.34

$M_{c,rd}$	12.0
M_{cr}	140.1

λ_{LT}	0.29292
ϕ_{LT}	0.51397
χ_{LT}	1.04060
χ_{limite}	11.65454
$\chi_{LT,último}$	1.00000

$M_{b,rd}$	12.0	Verificação	1
M_{Ed}	6.7		

Dispensa de encurvadura

	z	λ
M_{cr}	140.1	0.293
N_{Ed}/N_{cr}	0.048	

Anexo 3. Folhas de cálculo – Método da Resistência Direta

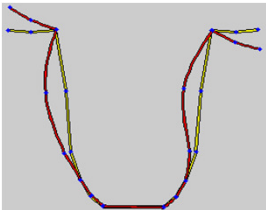
Propriedades

Perfil	
$A \text{ (mm}^4\text{)}$	625.06
$I_y \text{ (mm}^4\text{)}$	1691872.60
$z_G \text{ (mm)}$	70.23
$W_e \text{ (mm}^3\text{)}$	24090.45
$M_y \text{ (kN.m)}$	7.71

Aço	
$f_y \text{ (MPa)}$	320

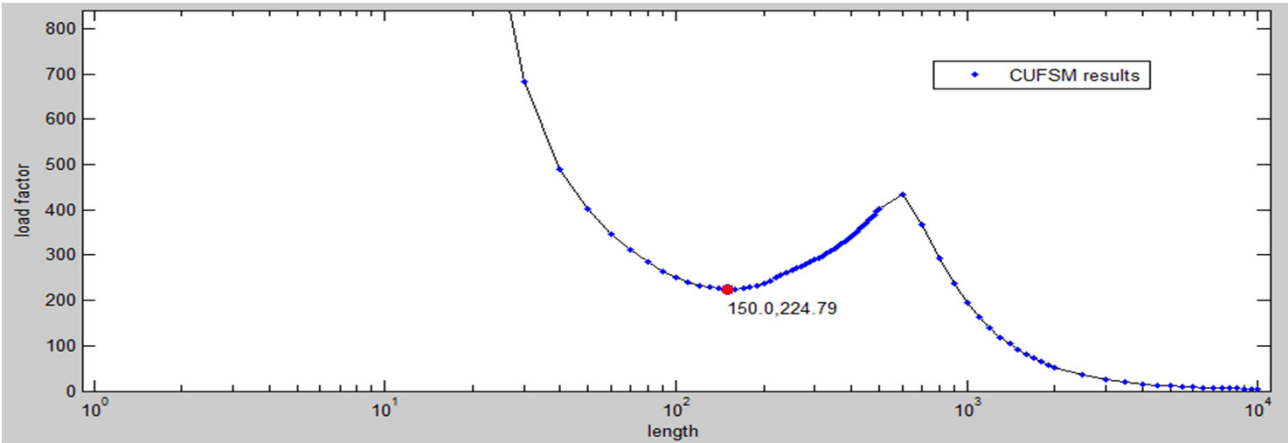
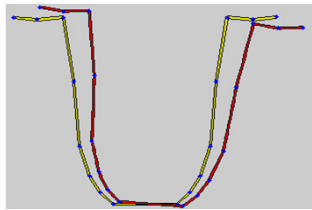
Compressão

Modo Local	
$L_{cr,local} \text{ (mm)}$	150
P_{crl}/P_y'	224.79
$P_y' \text{ (kN)}$	625.06
$P_y \text{ (kN)}$	200.02
$P_{crl} \text{ (kN)}$	140.51



Modo Distorcional	
$L_{cr,dist} \text{ (mm)}$	-
P_{crd}/P_y'	-
$P_y' \text{ (kN)}$	-
$P_y \text{ (kN)}$	-
$P_{crd} \text{ (kN)}$	-

Modo Global	
$L \text{ (mm)}$	1000
P_{cre}/P_y'	195.95
$P_y' \text{ (kN)}$	625.06
$P_y \text{ (kN)}$	200.02
$P_{cre} \text{ (kN)}$	122.48



λ_l	0.85
P_{nl}	95.51

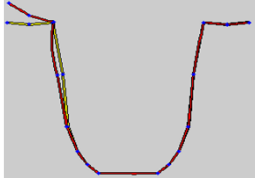
λ_d	-
P_{nl}	-

λ_c	1.28
P_{ne}	100.98

$P_n \text{ (kN)}$	95.51
Ω	1
$P \text{ (kN)}$	95.51

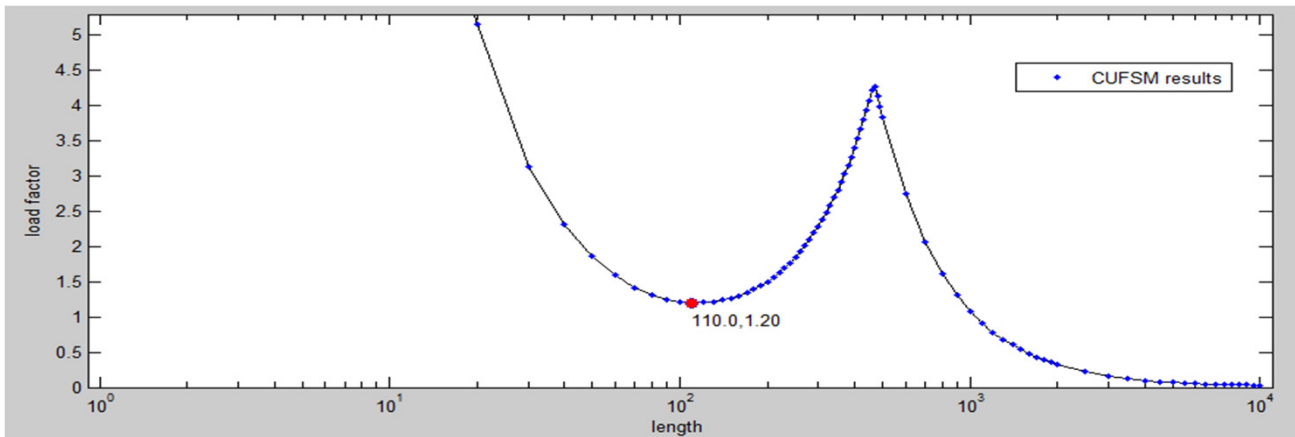
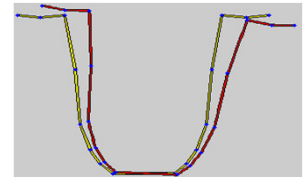
Flexão

Modo Local	
$L_{cr,local}$ (mm)	110
M_{cri}/M_y'	1.2
M_y' (kN.m)	7708.95
M_{cri} (kN.m)	9.25



Modo Distorcional	
$L_{cr,dist}$ (mm)	-
M_{crd}/P_y'	-
M_y' (kN.m)	-
M_{crd} (kN.m)	-

Modo Global	
L (mm)	1000
M_{crle}/P_y'	1.08
M_y' (kN.m)	7708.95
M_{cre} (kN.m)	8.33



λ_l	0.91
M_{nl}	6.10

λ_d	-
M_{nd}	-

M_{ne}	6.36
----------	------

M_n (kN.m)	6.10
Ω	1
M (kN.m)	6.10

Flexão Composta

P_n (kN)	95.51
Ω_c	2

M_n (kN.m)	6.10
Ω_b	2

Modo Local	
λ_l	1.19
$P_{nl,0}$	151.05

Modo Distorcional	
λ_d	-
$P_{nd,0}$	-

Modo Global	
P_{ne} (kN)	200.02

Cargas atuantes	
P (kN)	4.96
M (kN.m)	1.58

$P_{n,0}$ (kN.m)	151.05
C_m	1.00
P_E	122.48
α	0.9190

Verificação	
0.67	0.58

Pórtico de Intermédio - Viga - Secção Simples

Secção

I_z (mm ⁴)	931629
I_y (mm ⁴)	1462829
i_z (mm)	54.80
i_y (mm)	68.67
A_{eff} (mm ²)	310.19
A (mm ²)	545.6
I_T (mm ⁴)	464.3
I_w (mm ⁶)	1176300000
$W_{eff,y}$ (mm ³)	18830.3
$W_{eff,z}$ (mm ³)	9006.9

Material

f_y (N/mm ²)	320
E (GPa)	210
G (Gpa)	81

Compressão

$L_{cr,z}$ (m)	1
$L_{cr,y}$ (m)	1

λ_1	80.4794
λ_z	0.1710
λ_y	0.1364
λ	0.1710

α	0.340
ϕ	0.510
χ	1.010
χ	1.000

$N_{b,rd}$	99.26	Verificação	1
N_{Ed}	4.96		

Dispensa de encurvadura

	z	y	λ
N_{cr}	1930.9	3031.9	0.171
N_{Ed}/N_{cr}	0.003	0.002	

Flexão y

C_1	1
L_{cr}	1
α	0.34

$M_{c,rd}$	6.026
M_{cr}	69.139

λ_{LT}	0.29522
ϕ_{LT}	0.51487
χ_{LT}	1.03974
χ_{limite}	11.47404
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	6.03	Verificação	1
M_{Ed}	1.58		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	69.1	0.295
N_{Ed}/N_{cr}	0.023	

Flexão z

C_1	1
L_{cr}	1
α	0.34

$M_{c,rd}$	2.882
M_{cr}	86.636

λ_{LT}	0.18240
ϕ_{LT}	0.47548
χ_{LT}	1.08230
χ_{limite}	30.05894
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	2.88	Verificação	1
M_{Ed}	0.00		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	86.6	0.182
N_{Ed}/N_{cr}	0.000	

Verificação Esforços

Coeficiente	0.8	0.09	0.34	0.00	0.43
-------------	-----	------	------	------	------

Interação de Esforços - Secção

e_{Ny}	0.005	e_{Nz}	0.000
----------	-------	----------	-------

0.050	0.266	0.000	0.32
-------	-------	-------	------

Interação de Esforços - Barra

K_{yy}	0.6025
K_{yz}	0.0000
K_{zy}	0.9988
K_{zz}	0.0000

C_{my}	0.6
C_{mz}	0.6
C_{mLT}	0.6

0.050	0.160	0.000	0.21
-------	-------	-------	------

0.050	0.266	0.000	0.32
-------	-------	-------	------

Anexo 4. Folhas de cálculo – Verificação de segurança da estrutura flexível

Sistema Flexível

Compressão - Contraventamento

f_y (N/mm ²)	275
E (GPa)	210
I_z (mm ⁴)	8620000
I_y (mm ⁴)	8620000
i_z (mm)	46.02
i_y (mm)	46.02
A_{eff} (mm ²)	4070
A (mm ²)	4070

$L_{cr,z}$ (m)	5.7
$L_{cr,y}$ (m)	5.7

λ_l	86.815
λ_z	1.427
λ_y	1.427
λ	1.427

Curva de encurvadura	a	a	b	c
factor de imperfeição	0.13	0.21	0.34	0.49

α	0.130
ϕ	1.597
χ	0.432
χ	0.432

$N_{b,rd}$	483.3	Verificação	1
N_{Ed}	201		

Dispensa de encurvadura

	z	y	λ
N_{cr}	549.9	549.9	1.427
N_{Ed}/N_{cr}	0.366	0.366	

Pórtico de extremidade - Pilar Intermédio superior

Secção

I_z (mm ⁴)	8620000
I_y (mm ⁴)	8620000
i_z (mm)	46.02
i_y (mm)	46.02
A_{eff} (mm ²)	4070
A (mm ²)	4070
I_T (mm ⁴)	17240000
I_w (mm ⁶)	247000000
$W_{eff,y}$ (mm ³)	123000
$W_{eff,z}$ (mm ³)	123000

Material

f_y (N/mm ²)	275
E (GPa)	210
G (Gpa)	81

Compressão

$L_{cr,z}$ (m)	5.5
$L_{cr,y}$ (m)	5.5

λ_1	86.8147
λ_z	1.3766
λ_y	1.3766
λ	1.3766

α	0.130
ϕ	1.524
χ	0.459
χ	0.459

$N_{b,rd}$	513.91	Verificação	1
N_{Ed}	31.70		

Dispensa de encurvadura

	z	y	λ
N_{cr}	590.6	590.6	1.377
N_{Ed}/N_{cr}	0.054	0.054	

Flexão y

C_1	1
L_{cr}	5.5
α	0.13

$M_{c,rd}$	33.825
M_{cr}	908.164

λ_{LT}	0.19299
ϕ_{LT}	0.50051
χ_{LT}	1.02850
χ_{limite}	26.84890
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	33.83	Verificação	1
M_{Ed}	9.70		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	908.2	0.193
N_{Ed}/N_{cr}	0.011	

Flexão z

C_1	1
L_{cr}	5.5
α	0.13

$M_{c,rd}$	33.825
M_{cr}	908.164

λ_{LT}	0.19299
ϕ_{LT}	0.50051
χ_{LT}	1.02850
χ_{limite}	26.84890
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	33.83	Verificação	1
M_{Ed}	0.00		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	908.2	0.193
N_{Ed}/N_{cr}	0.000	

Verificação Esforços

Coeficiente	0.8	0.11	0.37	0.00	0.48
-------------	-----	------	------	------	------

Interação de Esforços - Secção

e_{Ny}	0.000	e_{Nz}	0.000
----------	-------	----------	-------

0.062	0.287	0.000	0.35
-------	-------	-------	------

Interação de Esforços - Barra

K_{yy}	0.6222
K_{yz}	0.0000
K_{zy}	0.9912
K_{zz}	0.0000

C_{my}	0.6
C_{mz}	0.6
C_{mLT}	0.6

0.062	0.178	0.000	0.24
-------	-------	-------	------

0.062	0.284	0.000	0.35
-------	-------	-------	------

Pórtico Intermédio - Pilar Intermédio superior

Secção

I_z (mm ⁴)	8620000
I_y (mm ⁴)	8620000
i_z (mm)	46.02
i_y (mm)	46.02
A_{eff} (mm ²)	4070
A (mm ²)	4070
I_T (mm ⁴)	17240000
I_w (mm ⁶)	247000000
$W_{eff,y}$ (mm ³)	123000
$W_{eff,z}$ (mm ³)	123000

Material

f_y (N/mm ²)	275
E (GPa)	210
G (Gpa)	81

Compressão

$L_{cr,z}$ (m)	5.5
$L_{cr,y}$ (m)	5.5

λ_1	86.8147
λ_z	1.3766
λ_y	1.3766
λ	1.3766

α	0.130
ϕ	1.524
χ	0.459
χ	0.459

$N_{b,rd}$	513.91	Verificação	1
N_{Ed}	31.00		

Dispensa de encurvadura

	z	y	λ
N_{cr}	590.6	590.6	1.377
N_{Ed}/N_{cr}	0.052	0.052	

Flexão y

C_1	1
L_{cr}	5.5
α	0.13

$M_{c,rd}$	33.825
M_{cr}	908.164

λ_{LT}	0.19299
ϕ_{LT}	0.50051
χ_{LT}	1.02850
χ_{limite}	26.84890
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	33.83	Verificação	1
M_{Ed}	16.00		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	908.2	0.193
N_{Ed}/N_{cr}	0.018	

Flexão z

C_1	1
L_{cr}	5.5
α	0.13

$M_{c,rd}$	33.825
M_{cr}	908.164

λ_{LT}	0.19299
ϕ_{LT}	0.50051
χ_{LT}	1.02850
χ_{limite}	26.84890
$\chi_{LT,ultimo}$	1.00000

$M_{b,rd}$	33.83	Verificação	1
M_{Ed}	0.00		

Dispensa de encurvadura

	-	λ
M_{cr}	908.2	0.193
N_{Ed}/N_{cr}	0.000	

Verificação Esforços

Coeficiente	0.8	0.11	0.55	0.00	0.66
-------------	-----	------	------	------	------

Interação de Esforços - Secção

e_{Ny}	0.000	e_{Nz}	0.000
----------	-------	----------	-------

0.060	0.473	0.000	0.53
-------	-------	-------	------

Interação de Esforços - Barra

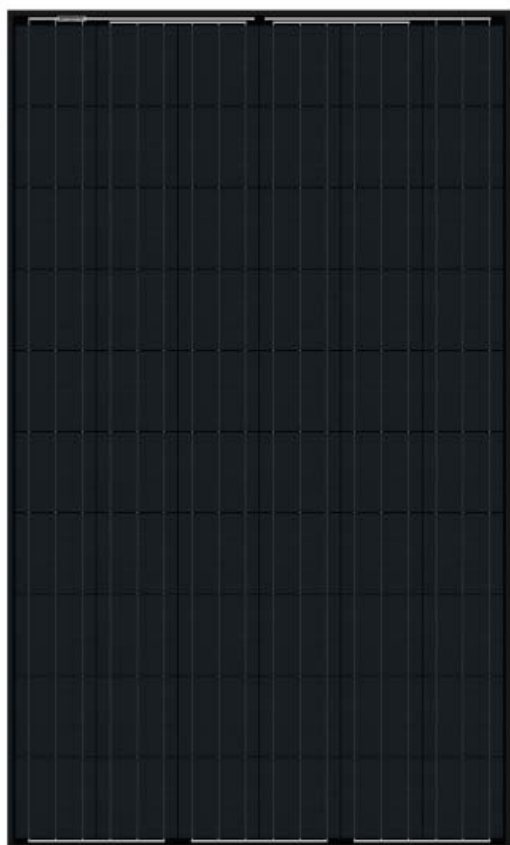
K_{yy}	0.6217
K_{yz}	0.0000
K_{zy}	0.9914
K_{zz}	0.0000

C_{my}	0.6
C_{mz}	0.6
C_{mLT}	0.6

0.060	0.294	0.000	0.35
-------	-------	-------	------

0.060	0.469	0.000	0.53
-------	-------	-------	------

Anexo 5. Ficha técnica MPrime –PV Modules 240-255 W



THE COMPANY

Specialized in the distribution of PV modules, kits and components, MPrime focuses on flexibility, excellence in service and continuous technological innovation, in order to provide our clients all over the world with the best portfolio, service and warranties. Part of Martifer Solar, MPrime benefits from a wide international experience in solar photovoltaic installations.

MPRIME MODULE STRENGTHS

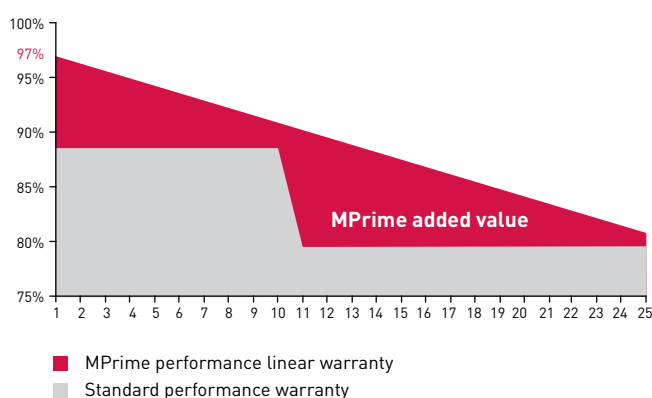
- Efficiency and life performance.
- Positive power up to 4.99 Watts.
- Its 4 mm glass is suitable for hail and snow climates, and its internal textured surface increases the solar radiation absorption.
- Produced in a fully automated and robotized PV production line with a yearly installed capacity of 50 MW, extendable to 100 MW, with highly controlled processes and environment, allowing the production of a module with the highest level of quality.

WARRANTY

MPrime ensures its modules with a first-class warranty:

- 25 years performance linear warranty: maximum annual decrease of 0.68% after year number two. Year 25: 80.7%. In accordance with the applicable MPrime Guarantee Conditions in force at the time of purchase and available in MPrime module's warranty certificate.
- Product warranty: 10 years

BENEFITS OF THE LINEAR WARRANTY



CAUTION: read safety and installation instructions before using the product. (available in WWW.MPRIMESOLAR.COM).

DISCLAIMER: specifications included in this datasheet are subject to change without previous notice from the company. In case of any conflicts/problems that may arise due to misinterpretation, prevailing conditions are the ones described in the original version (in English).



ELECTRICAL SPECIFICATIONS *

Maximum Power (Wp)	P _{MAX}	240	245	250	255
Positive Power Tolerance	P _{NOM}	[P _{NOM} -0 ; P _{NOM} +4.99W]			
MPP Current (A)	I _{MPP}	8.26	8.40	8.53	8.66
MPP Voltage (V)	V _{MPP} / U _{MPP}	29.07	29.16	29.30	29.45
Open Circuit Voltage (V)	V _{OC} / U _{OC}	36.97	37.08	37.26	37.60
Short Circuit Current (A)	I _{SC}	8.64	8.80	8.89	8.98
Module Efficiency	n (%)	14.9	15.2	15.5	15.8
Maximum System Voltage	V _{SYST}	+ 1,000 V **			
Maximum Series Fuse Rating		12 A			
NOCT		48 °C +/-1,5°C			
Temperature Coefficients:					
Power	γ(Pmax)	-0.452%/°C			
Voltage	β(Voc)	-0.351% /°C			
Current	α(Isc)	0.031%/°C			

* Values at Standard Test Conditions STC (air mass AM 1.5, irradiance 1,000 W/sqm, cell temperature 25°C)

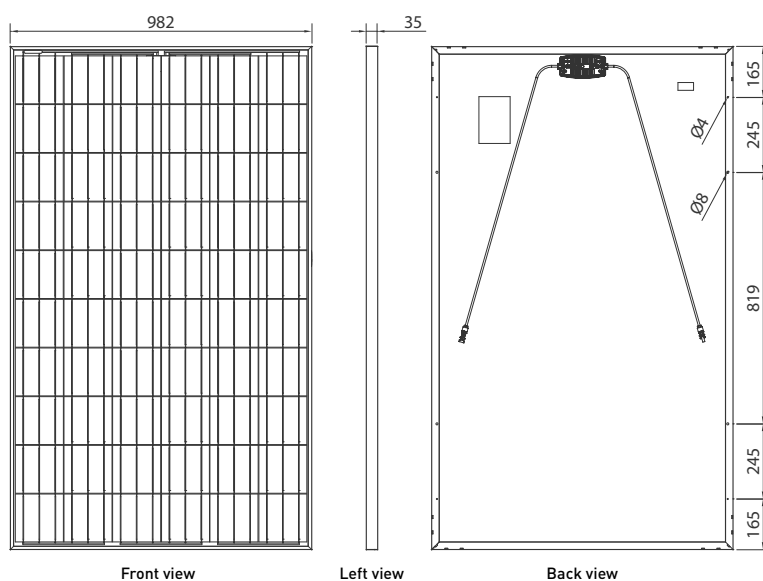
Tolerance of measured maximum power: ±3%

** Positive voltage

MECHANICAL SPECIFICATIONS

Dimensions	1,639 x 982 x 35 mm
Weight	20 kg
Solar Cells	60 monocrystalline 6 inch cells
Front Cover	Tempered and Textured 4 mm Glass
Encapsulant	EVA (Ethylene Vinyl Acetate)
Back Cover	Black PPE (Polyester Polyester Primer)
Frame	Black Anodized aluminium
Diodes	3 Bypass Diodes (10,5A)
Junction Box	IP 65 W/ 3 Bypass Diodes
Cable	2 Cables of 0.9 m / MC4 compatible connectors

DIMENSIONS (All figures are in mm.)

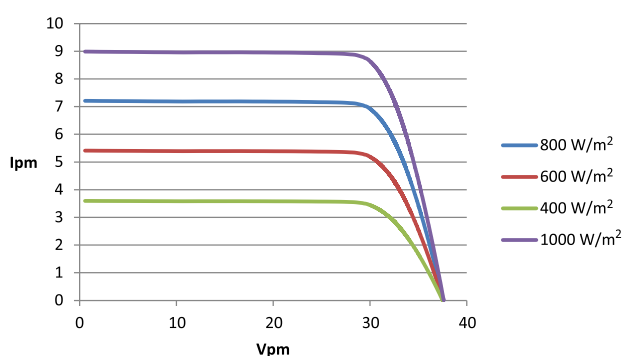


PACKAGING

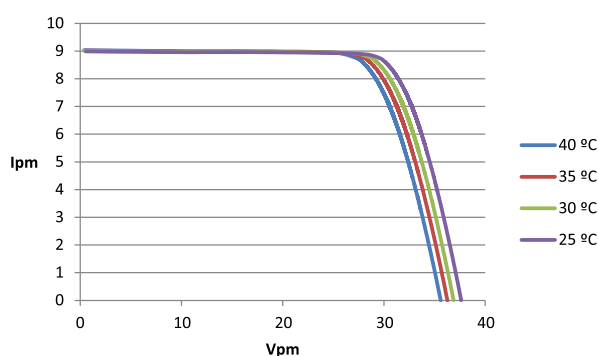
Modules per pallet	35 modules
Modules per 40 ft container	525 modules

I-V CURVES

I-V Curve at Different Irradiance Levels

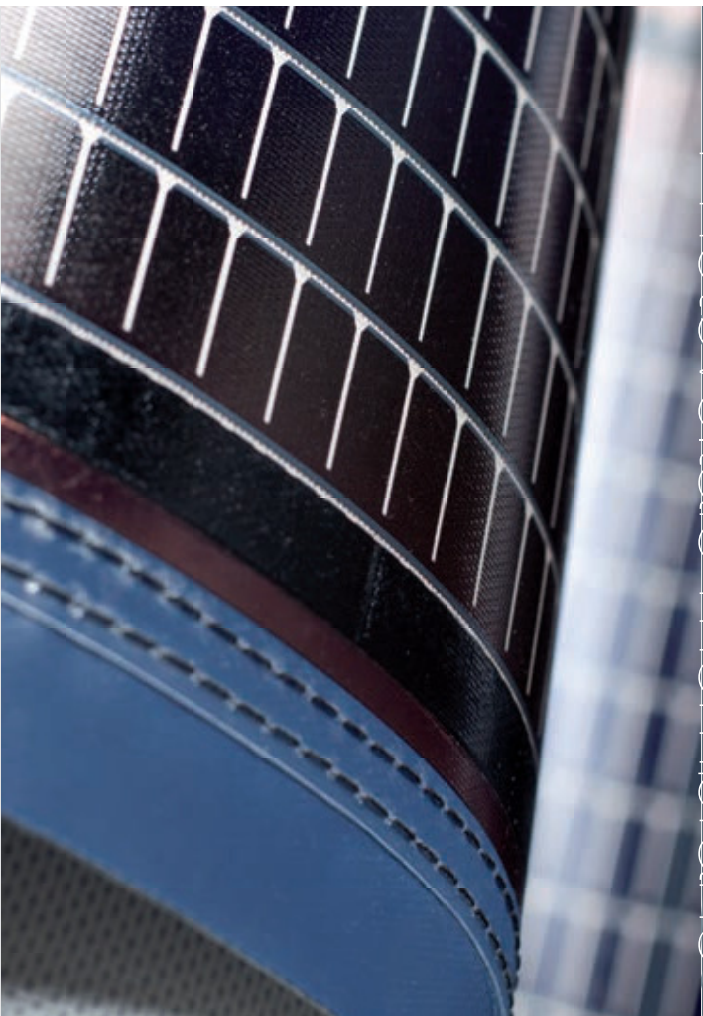


I-V Curve at Different Temperatures



Anexo 6. Ficha técnica *Texysolar*

Photovoltaic membrane



TEXYSOLAR

www.sergeferrari.com

Serge Ferrari

Photovoltaic membrane

A complete range

Texysolar is available in 6 module sizes.

Power-related Texysolar module dimensions	Texysolar 25 Wp*	Texysolar 50 Wp*	Texysolar 100 Wp*
Single	395 x 2024 mm	395 x 3632 mm	395 x 7142 mm
Twin	713 x 1065 mm	713 x 1868 mm	713 x 3622 mm

* Wp = Watts-peak

- > Texysolar is delivered with its two connectors and is ready for connection.
- > A full range of electrical accessories is available: extension leads, ducts, etc. Please consult us.

Technical data

	Texysolar 25 Wp		Texysolar 50 Wp		Texysolar 100 Wp	
	Single	Twin	Single	Twin	Single	Twin
Area [sqm]	0.799	0.759	1.434	1.332	2.821	2.582
Weight [kg]	1.15	1.1	1.95	1.85	3.75	3.55
Nominal power [Wp]	25	25	50	50	100	100
Voltage at maximum power Umpp [V]	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4
Current at maximum power Impp [A]	1.8	1.8	3.3	3.3	6.6	6.6
Packaging dimensions L x l x h [cm]	50 x 25 x 25	84 x 25 x 25	50 x 25 x 25	84 x 25 x 25	50 x 25 x 25	84 x 25 x 25

Nominal characteristics under standard test conditions (STC: 1000 watt/m², 25°C - Spectrum 1.5AM1). A detailed technical datasheet is available on request.

The technical data above are averaged values with a +/- 10% tolerance.

The buyer of our products is fully responsible for their application and their transformation concerning any possible third party. The buyer of our products is responsible for their implementation and installation according to the standards, use and customs and safety rules of the countries where they are used. Concerning the contractual warranty, please refer to the text of our warranty.

The values mentioned above are the results of tests performed in conformity with the use and customs in terms of studies; they are given as an indication in order to allow our customers to make the best use of our products. Our products are subject to evolutions due to technical progress; we remain entitled to modify the characteristics of our products at any time. The buyer of our products is responsible to check that the above data is still valid at time of fabrication.

www.sergeferrari.com

Downloading, technical data, references, photos, and much more.

Sustainable development 100% recyclable

Serge Ferrari development is based on strict adherence to good safety and environmental practices. This includes an understanding of Life Cycle Analysis (LCA), selection of the best materials, and eco-design. The Company obtained its first ISO 14001 certification in 2003.

www.texyloop.com



Photos: Serge Ferrari sas

*Texysolar is a Serge Ferrari sas registered trade mark,
Jean Vasseur Communication - GB 600 DEC 2011/V1,01

Serge Ferrari

EUROPE
SERGE FERRARI SAS
L'ESPERANCE - FRANCE
Tél. +33 (0)4 74 97 41 33
Tél. +41 (0)44 898 26 26

NORTH AMERICA
SERGE FERRARI NORTH AMERICA
P.O. Box 1400
Tél. +1 954 842 3000

LATIN AMERICA
SERGE FERRARI
SABO PAULI - BRAZIL
Mexico - MEXICO

Tél. +56 (0) 299 0019
Tél. +55 (11) 3262 3466
Tél. +52 (55) 5565 2900

MIDDLE EAST
SERGE FERRARI (DUBAI)
Dubai - U.A.E.
Tél. +971 (0) 4 609 4140

ASIA / PACIFIC
SERGE FERRARI
Shanghai - CHINA
Tél. +86 21 6211 6586
Tokyo - JAPAN
Tél. +81 0467 24 36 00
Sydney - AUSTRALIA
Tél. +61 2 9719 1597

TEXYSOLAR

Self-adhesive photovoltaic membrane

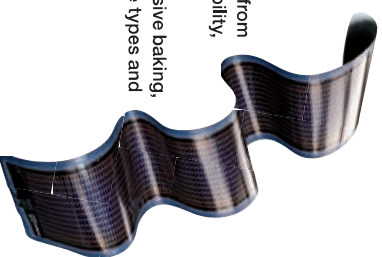
Advantages: Lightweight, flexible, ready-to-use, easy to install, durable, high-performance power generation

Applications: New or existing permanent textile structures

Custom fit your textile structures and generate your own power

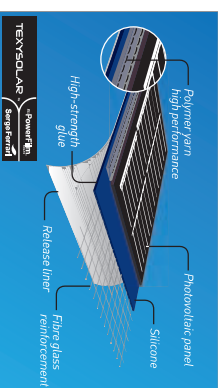
Texysolar is a high-performance photovoltaic membrane, which differs from conventional rigid modules due to its unmatched lightness and flexibility, whilst offering a proportionally higher efficiency in low light conditions.

Texysolar exclusiveness: the panel features a high-strength self-adhesive backing, which simplifies installation and enhance durability on diverse surface types and shapes in new or existing textile structures.



An integrated complete system

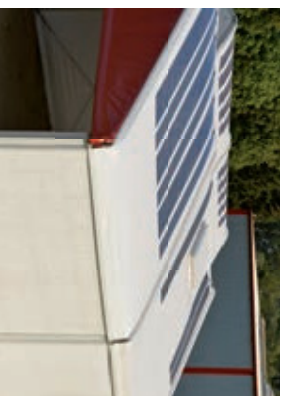
- Texysolar is a self-adhesive photovoltaic membrane, which is assembled by sewing:
 - > a very high-performance, silicone and fibre glass based Serge Ferrari composite,
 - > Power Film photovoltaic panels made of double junction amorphous silicon.
- Associated with Précontraint Serge Ferrari membranes, this assembly ensures high strength in photovoltaic installations.



Exclusive: a self-adhesive backing for easy installation

Lightness, flexibility and discretion: distinct advantages

- Texysolar is 10 times lighter than a conventional rigid solution and 3 times lighter than other textile solutions. Texysolar displays a unit weight of only 1.4 Kg/sqm. A major advantage for equipping textile structures to:
 - > minimise induced stresses to be resisted,
 - > achieve an unmatched ratio of 27 Wp/kg, compared with 12 Wp/kg for conventional solutions.
- Its thinness and flexibility enable it to adapt to single and double curvatures in textile structures and to hug the sheet metal undulating shapes and glass or metal angular shapes.



Texysolar meets the demand of lightness required by the textile structures.

Ready-to-use for easy installation and suited to every situation

- Texysolar can be rolled to a small 10 cm diameter: it is lightweight and compact to transport.
- The Texysolar module is ready for use due to its high-strength self-adhesive. Just remove the protective release liner and apply Texysolar directly to the surface.
- Texysolar respects the integrity of the support since its installation requires neither perforation nor structural transformation or modification.
- Site installation on new or existing structures enables exposure to be checked and location to be optimised in relation with the sun orientation.



Texysolar facilitates installation: it requires neither installation equipment nor preliminary making or welding.

Texysolar: unfailing strength

Wind tunnel test

- Texysolar resists 250 km/h winds and prevents any "lapping" effect. *(Wind tunnel test at CMEFFE independent laboratory - Geneva)*
- Texysolar is an effective solution against theft or vandalism.



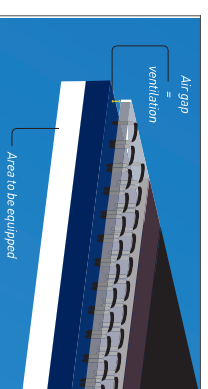
Resistance to impacts

- The impact propagation area is limited and the durability is enabled by the printed interconnect of the photovoltaic panel: bullet impacts test shows that even when perforated, Texysolar conserves its production capacity. *(Power Film Impact test: video available on request)*



Advantages of sewn assembly

- Greater reliability: the panels are sewn and not welded, they are disconnected from the loads transferred to the support structure.
- Durability: this assembly allows air to circulate, heat is naturally dissipated.



High-performance technology

- Amorphous silicon double junction technology and low level of laminate dirt accumulation support relatively higher efficiency:
 - > generally irrespective of panel inclination,
 - > even at low luminosity, shade effects, diffuse light or limited dirt.
- The energy produced can be used directly or resold to the grid.

